



Suvi Tähtinen

## **Sisätilan mallinnus – Case Startup Sauna**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 20.5.2015

Valvoja: Professori Henrik Haggrén

Ohjaaja: TkT Ville Lehtola

<b>Tekijä</b> Suvi Tähtinen		
<b>Työn nimi</b> Sisätilan mallinnus – Case Startup Sauna		
<b>Koulutusohjelma</b> Geomatiikka		
<b>Pää-/sivuaine</b> Fotogrammetria ja kaukokartoitus	<b>Koodi</b> M3006	
<b>Työn valvoja</b> Professori Henrik Haggrén		
<b>Työn ohjaaja(t)</b> TkT Ville Lehtola		
<b>Päivämäärä</b> 20.5.2015	<b>Sivumäärä</b> 82 (8)	<b>Kieli</b> Suomi

## Tiivistelmä

Tässä työssä tarkastellaan sisätilojen kolmiulotteista mallinnusta käyttäen kolmea erilaista kuvausmenetelmää tilatiedon keräämiseen. Lisäksi pohditaan tiedonkeruun ja -käsittelyn prosesseja ja eri menetelmin tuotetun tilatiedon laatua. Vertailussa on kolme kolmiulotteista pistepilveä. Yksi on tuotettu laserkeilaimella, toinen fotogrammetrisesti valokuvista ja kolmas Matterportin syvyyskamera-pilvipalveluyhdistelmällä. Mallinnuskohteena on Espoossa sijaitseva Startup Sauna.

Työssä on pohdittu käytettävyyttä ja perusteltu, miksi perinteinen valokuvaus ja Matterport-kuvaus soveltuvat käytettävyydeltään mallinnustyössä aloittelijoille, ja miksi laserkeilaus puolestaan ei sovellu.

Testatuin menetelmin on varsinaisen pistepilvidatan lisäksi mahdollista saada aikaan kolmiulotteisia visuaalisia esityksiä kohteesta. Pistepilvien jatkoprosessointi teksturoiduiksi pintamalleiksi ulottuu tämän työn ulkopuolelle.

**Avainsanat** Matterport, syvyyskamera, laserkeilaus, valokuvaus, 3D-mallinnus, sisätilamallinnus, Startup Sauna

---

<b>Author</b> Suvi Tähtinen		
<b>Title of thesis</b> Indoor modelling – Case Startup Sauna		
<b>Degree programme</b> Degree Programme in Geomatics		
<b>Major/minor</b> Photogrammetry and Remote Sensing	<b>Code</b> M3006	
<b>Thesis supervisor</b> Professor Henrik Haggrén		
<b>Thesis advisor(s)</b> TkT Ville Lehtola		
<b>Date</b> 20.5.2015	<b>Number of pages</b> 82(8)	<b>Language</b> Finnish

---

### **Abstract**

This thesis studies indoor 3D modelling using three different imaging methods for collecting spatial data. Additionally data collection and data processing processes are studied and the quality of spatial data collected with different methods. Three different three-dimensional point clouds are compared. One is generated using laser scanning, second photogrammetrically from photographs and third with the combination of Matterport depth camera and cloud service. Modelling subject is Startup Sauna, located in Espoo.

The thesis studies usability and explains why traditional photography and Matterport imaging are suitable for beginners for their usability, and why laser scanning is not.

With the tested methods it is possible to generate three dimensional visual presentations of the subject in addition to the actual point cloud data. Further processing of point clouds into textured surface models is out of scope of this thesis.

---

**Keywords** Matterport, depth camera, laser scanning, photography, 3D modelling, indoor modelling, Startup Sauna

---

## Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty opinnäytteeksi Aalto-yliopiston Insinööritieteiden korkeakoululle. Työn valvojana on toiminut professori Henrik Haggrén ja ohjaajana TkT Ville Lehtola. Kiitokset heille ohjauksesta ja neuvoista.

Tahdon kiittää myös Milka Nuikkaa, Matti Kurkelaa ja Petri Rönholmia työhön liittyneistä neuvoista ja avusta. Kiitos Startup Saunalle ja sen väelle mahdollisuudesta työskennellä kiinnostavan kohteen parissa.

Kiitos perheelle kannustuksesta, ystäville vertaistuesta, ja erityisesti puolisololleni kiitos kärsivällisyydestä, tuesta ja myötäelämisestä.

Espoo 20.5.2015

Suvi Tähtinen



# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo .....	4
Termistö .....	6
1 Johdanto .....	7
2 Aikaisempi tutkimus .....	11
2.1 Valokuvaan perustuva 3D-mallinnus .....	11
2.2 Laserkeilaimella hankittava 3D-tilatieto .....	17
2.3 Syvyyskameroiden käyttö ympäristön mallinnuksen välineenä .....	20
3 Mallinnuskohde ja välineet .....	24
3.1 Kuvauskohde – Startup Sauna .....	24
3.2 Välineiden ja ohjelmien esittely .....	26
3.2.1 Laserkeilain – Faro Focus <sup>3D</sup> .....	26
3.2.2 Matterport .....	27
3.2.3 Valokuvauskamera - Nikon D800E .....	28
3.2.4 Käytettävät ohjelmistot .....	29
4 Tulokset .....	31
4.1 Datan keruu .....	31
4.1.1 Kuvausten suunnittelu ja aikataulu .....	31
4.1.2 Laserkeilaus .....	34
4.1.3 Matterport .....	35
4.1.4 Valokuvat .....	37
4.2 Datan käsittely .....	39
4.2.1 Laserkeilaus .....	39
4.2.2 Matterport .....	42
4.2.3 Valokuvat .....	42

4.3 Pistepilvet ja visualisointi .....	44
4.3.1 Laserkeilaus.....	44
4.3.2 Matterport.....	49
4.3.3 Valokuvat .....	54
4.3.4 Eri menetelmien tuottamien tilatietojen keskinäinen vertailu.....	57
5 Yhteenveto .....	67
Lähteluettelo .....	71
Liiteluettelo .....	74

## Termistö

BIM	building information modeling
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
IBM	Image-based-modeling
IBR	Image-based-rendering
Intensiteetti	Pinnan heijastaman valon voimakkuus
Intensiteettikuva	Kaksiulotteinen kuva kohteesta jossa harmaasävyin esitetään kohteen pinnan heijastuskyky
Kuvakanta	Kahden kuvan ottopaikkojen väli
Kuvausgeometria	Kuvaussijaintien keskinäinen sijoittuminen
Piirre	Esineelle tai asialle yksilöllinen selkeästi erottuva yksityiskohta tai ominaisuus
Pistepilvi	Kolmiulotteinen datajoukko joka edustaa objektin/kohteen pinnan sijaintia, pinnalle sijoittuvan pistejoukon avulla
Referenssitähys / tähys	Mittauksen yhteydessä käytettävä objekti, usein pallo, tai paperille tulostettu shakkilautakuvio, jonka avulla kaksi eri laitesijainnillista mittausta voidaan yhdistää.
Resoluutio	Kuvan digitaalinen koko pikseleinä
SaaS	Software as a Service
SIFT	Scale-invariant feature transform
Suodatus	Pisteistön harvennus pisteitä poistamalla. (Virheellisten pisteiden tunnistus ja poisto pistejoukosta.)
Tasokuva	Projektio kaksiulotteiselle pinnalle kolmiulotteisesta kohteesta
Time-of-flight	ToF, metodi jossa mittaa valon kulkuaikaa mittainstrumentin ja kohteen välillä. Kulkuajan perusteella on laskettavissa valon taittaman matkan pituus

# 1 Johdanto

Tässä työssä perehdytään erilaisiin menetelmiin, joilla kerätään sisätiloissa kaksi- tai kolmiulotteista dataa kolmiulotteisessa mallinnuksessa hyödynnettäväksi. Tutkimuksen aikana perehdytään eri menetelmien toiminta- ja asiantuntemusvaatimuksiin, tarvittaviin välineisiin ja käytettävyyteen, sekä kerättävän tilatiedon keskinäiseen vertailuun. Kuvattavaksi kohteeksi on valittu Espoon Otaniemessä sijaitseva Startup Sauna, joka on kenelle tahansa avoin tila, jota on mahdollista käyttää muun muassa ryhmätyöskentely-, opetus- ja tapaamispaikkana. Tila itsessään sisältää toisistaan poikkeavia tilaelementtejä ja -rakenteita, jotka herättivät kiinnostusta tilan kuvaamiseen ja mallinnukseen liittyen. Tilaa esitellään tarkemmin luvussa 3.1.

Kolmiulotteisen mallinnuksen menetelmien tutkimiselle motivaationa ovat mallien hyödyntämismahdollisuudet tulevaisuudessa. Kolmiulotteiset mallit tarjoavat visuaalisen välineen esimerkiksi myytävien tai vuorattavien tilojen mainostukseen. Monipuolisten ja muunneltavien tilojen soveltuvuutta erilaisiin käyttötarkoituksiin pystytään esittelemään visualisesti mallinnuksen avulla. Rakennusten mallintaminen mahdollistaa rakennetun ympäristön dokumentoimisen ja helpottaa näin rakennusten laajennus-, korjaus- tai jälleenrakennus projektien suunnittelua. Tällaisesta käyttömahdollisuudesta esimerkkinä toimii rakennustilatiedon mallinnus (BIM, building information modelling), josta hyödyllisiksi vaikutuksiksi on havaittu muun muassa rakennusprojekteissa madaltuneet kulut, parantunut ajanhallinta ja rakennusprojektien parantunut kannattavuus (Azhar et al. 2012). Muita potentiaalisia käyttöalueita ovat muun muassa kiinteistökaupan yhteydessä tehtävät virtuaaliset kohde-esittelyt, sekä kulttuuriperinnön dokumentointi (Remondino 2011). Suurten rakennuskohteiden lisäksi pienempien kulttuurikohteiden kuten museoiden dokumentointi ja virtuaaliesitykset, jollaisia on jo nyt tarjolla esimerkiksi Smithsonian Luonnonhistorian museolla (Smithsonian National Museum of Natural History, <http://www.mnh.si.edu/panoramas/>), ovat myös mahdollisia.

Nykypäivänä yksinkertaisten kolmiulotteisten mallien tuottaminen on helppoa ja tähän käytettäviä työvälineitä ja menetelmiä on tarjolla runsaasti. Fotorealististen ja mittatarkkojen mallien tuottaminen ei kuitenkaan välttämättä onnistu aiheeseen perehtymättömiltä. Digitaalisten mallien tuottamisen ja tarkkuuden merkitys ilmenee esimerkiksi kulttuuriperinnön arkistoinnin muuttaessa muotoaan perinteisestä

talletusmuodosta digitaaliseksi. Digitaalisia malleja esiintyy nykyisin kaikkialla ja niiden hyödyntäminen ja suosio ovat kasvaneet internetin myötä. Kohteiden mittaus ja mallinnus on jaettavissa kontaktimetodeihin, joissa mittaukseen liittyy fyysinen kontakti kohteen kanssa, ja ei-kontaktimetodeihin joita nykypäivänä pääasiassa käytetään. Ei-kontaktisiin metodeihin kuuluu muun muassa fotogrammetria ja laserkeilaus. (Remondino & El-Hakim 2006)

Laserkeilauksen toteuttamiseen on käytössä useita vaihtoehtoja joihin kuuluu ilma-, maa- ja mobiililaserkeilaus. Ilmalaserkeilausta suoritetaan yleensä kohtuullisen suuresta korkeudesta maanpintaan nähden ja keilattavat alueet ovat usein hyvin laajoja. Kuvausvälineistö yleisimmin sijoitetaan lentokoneeseen, jolloin keilaamalla kyetään tehokkaasti kattamaan suuria alueita. (Wehr & Lohr 1999)

Maalaserkeilauksessa kuvauslaitteisto sijoitetaan maantasoon ja valitun kohteen välittömään läheisyyteen. Keilausta suoritetaan usein kohteissa kiinteistä keilainsijainneista ja kuvausvälineistöä liikutellaan ainoastaan erillisten keilausotosten välillä. Keilattavat kohteet tai alueet ovat yleensä kooltaan suppeampia kuin ilmalaserkeilauksessa. Maalaserkeilaus on työmenetelmä tilanteisiin, joissa ilmalaserkeilaus ei menetelmänä ole käyttökelpoinen vaihtoehto. Esimerkkejä tällaisista tilanteista ovat sisätilat ja muut kohteet joihin ei ole näkyvyyttä ilmasta käsin. (Bornaz et al. 2003)

Ilma- ja maalaserkeilauksen lisäksi käytössä on monenlaisia sovelluksia mobiilista laserkeilauksesta. Tyypillisesti mobiililaserkeilausta tehdään maantasolta ja yksi yleisimmistä käytännön toteutuksista on autoon tai muuhun ajoneuvoon kiinnitetty keilain, jolla ympäristöstä kerätään tilatietoja kulkuvälineen liikkeellä ollessa. Tällä tavoin kartoitetaan esimerkiksi tieverkkoja ja näiden välitöntä lähiympäristöä. (Mendenhall 2011)

Mobiililaserkeilaus soveltuu tilanteisiin, joissa ilmalaserkeilauksen käyttö on mahdotonta näkyvyyden puuttumisen vuoksi, tai staattisten laiteasemien maalaserkeilaus on kömpelöä tai ongelmallista keilauksen kohteen olosuhteiden vuoksi. Laserkeilaimen liittäminen minkälaiseen tahansa haluttuun liikkuvaan alustaan on mahdollista ja

tutkimuksen kohteena on ollut erilaisia mobiililaserkeilauksen alustoja ja toteuttamistapoja. (Lehtola et al. 2015, Bosse et al. 2012, Liu et al. 2010)

Laserkeilauksen lisäksi nykyteknologia tarjoaa myös muita vaihtoehtoja ja välineitä ympäristön taltiointiin. Xbox-pelikonsolin Kinect-syvyyskameran ja muiden samankaltaisten kameroiden suosio on ollut viime vuosina kasvussa kuluttajien keskuudessa niiden saatavuuden helpottuessa, tekniikan yleistyessä ja hinnan laskiessa. Esimerkkinä tekniikan yleistymisestä on Intelin RealSense -kamerateknologia, jota on jo nyt saatavilla osana tavallisten taulutietokoneiden varustelua.

Kolmiulotteisten mallien tuottaminen on mahdollista perinteisellä valokuvauksella tuotetuista kaksiulotteisista kuvista erilaisin fotogrammetrisin menetelmin. Valokuvien ottaminen on vaivatonta, mutta kolmiulotteisen tilatiedon tuottaminen mittatarkkana ja kohdetta oikein kuvaavana on haastavaa ja vaatii asiantuntemusta.

Tässä työssä tarkasteltavat menetelmät valittiin niiden soveltuvuuden ja kiinnostavuuden vuoksi. Työssä käsitellään Matterport-kameralla tuotettua kolmiulotteista tilatietoa ja verrataan sitä laserkeilaamalla ja perinteisin valokuvin tuotettuihin kolmiulotteisiin pistepilviin. Laserkeilauksen menetelmänä pitäisi soveltua millaisen tahansa ympäristön mittaamiseen, mutta valitun kuvauskohteen rakenteelliset elementit ja runsas irtaimisto tilassa voivat vaikuttaa kerättävän tilatiedon tarkkuuteen ja kattavuuteen. Matterport on palvelun tarjoajan mukaan nimenomaan rakennusten sisätilojen kuvaamiseen ja mallinnukseen suunniteltu palvelu, ja työn yhteydessä pohditaan menetelmän soveltuvuutta valitun tilan kuvaamiseen. Valokuvat edustavat perinteisiä menetelmiä ja tarkoituksena on selvittää automaattisten mallinnusmenetelmien soveltuvuutta sisätilamallinnuksessa. Tulosten keskinäisten vertailujen lisäksi työssä pohditaan eri menetelmiin liittyviä työprosesseja, käytettyjen työvälineiden ja ohjelmien käytettävyyttä, toimivuutta ja vaatimuksia.

Tämän työn luvussa kaksi perehdytään lyhyesti sisätilojen kartoitukseen ja mallintamiseen jo tehtyjen tutkimusten kautta. Taustatutkimuksessa keskitytään erityisesti erilaisiin käytössä oleviin datankeruumenetelmiin ja kolmiulotteisen mallinnuksen datalle ja sen keruulle asettamiin vaatimuksiin. Luvussa kolme esitellään mallinnuskohteena ollut tila sekä käytetyt työvälineet. Eri menetelmien tuloksia

käsitellään luvussa neljä. Ensin tarkastellaan datan keruuseen ja käsittelyyn liittyviä kysymyksiä. Tämän jälkeen esitellään eri menetelmin tuotetut pistepilvet, sekä eri menetelmin tuotettujen pistepilvien välisiä eroja. Luvussa viisi kootaan lyhyesti yhteen työn tuottamat tulokset ja pohditaan saatujen tulosten yhtenevyyttä aikaisempaan tutkimukseen.

## 2 Aikaisempi tutkimus

Tilatiedon keräämiseen käytettävät sensorit voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, aktiivisiin ja passiivisiin sensoreihin. Molempien ryhmien sensorien toiminta perustuu valoaaltojen havaitsemiseen ja mittaamiseen. Passiivisissa sensoreissa käytössä on järjestelmän ulkopuolinen valonlähde ja kolmiulotteinen kohdetieto saadaan laskettua esimerkiksi kohteen tuottamasta varjostuksesta tai siluetista. Aktiivisissa järjestelmissä puolestaan laite itse on mitattavan valon lähteenä ja kohteen geometrisen tiedon mittaaminen perustuu valon kulkeman matkan kestoon.

Viime vuosina on myös tutkittu mahdollisuuksia yhdistää aktiivisia ja passiivisia sensoreita yhteen järjestelmään. Näin tavoitellaan kummankin sensorityypin hyviä puolia ja pyritään parantamaan ympäristöstä tallennetun 3D-tilatiedon tarkkuutta. Huomiota on pyritty kiinnittämään tekstuurittomien ja piirteettömien alueiden ja muuttuvan ympäristön aiheuttamiin ongelmiin. Yksi lähestymistapa on ollut yhdistää lähi-infrapuna- aluetta käyttävä säteen edestakaista kulkuaikaa mittaava järjestelmä yksittäiseen perinteiseen valokuvauskameraan. (Qingxiong Yang et al. 2010)

### 2.1 Valokuvaan perustuva 3D-mallinnus

Usein kolmiulotteisen mallinnuksen katsotaan olevan prosessi, jossa kohteesta mitatuista pistetiedoista muodostetaan teksturoitu kohteen pintamalli tai kolmioverkkomalli. Kolmiulotteista mallinnusta pitäisi kuitenkin ajatella kokonaisuutena, joka aloitetaan tiedon keräämisellä halutusta kohteesta ja jonka tavoitteena on saada aikaan kolmiulotteinen interaktiivinen virtuaalinen malli. Ympäristöä on mahdollista mallintaa ja kartoittaa kolmiulotteisesti kaksiulotteisen kuvadatan pohjalta erilaisin fotogrammetrisin menetelmin sekä manuaalisesti että automaattisesti. Realistisen ja tarkan kolmiulotteisen mallin tuottaminen kuvien pohjalta on aina haastavaa, mutta erityisesti kooltaan suurissa ja monimutkaisissa kohteissa hyvän mittatarkkuuden saavuttaminen voi olla vaikeaa. Kuvauskohteen mallinnusprosessille luomien haasteiden lisäksi ongelmallista on mallinnus kuvista, joiden kalibrointia ei tunneta tai käytetty kuvausgeometria kattaa kohteen heikosti, jolloin esimerkiksi kuvat on voitu ottaa liian etäältä toisistaan, jolloin yksittäinen elementti ei esiinny riittävän useilla kuvilla. Liian vähäinen yhteisten pisteiden määrä eri kuvilla voi myös olla seurausta pitkästä kuvanottovälistä. Tällöin kuvien keskinäisen asema kuvauskohteeseen suhteutettuna on



mahdotonta määrittää. Vaillinainen tai puuttuva kalibrointi voi johtaa kohteen mittasuhteiden tai muotojen vääristymiseen mallinnuksen aikana. Liian pitkän kuvanottovälin ollessa ongelmalähteenä on usein välttämätöntä käyttää kohteen pisteiden mittauksessa manuaalisia metodeja automaattisten välineiden sijaan. (Remondino & El-Hakim 2006)

Remondino ja El-Hakim (2006) esittävät katsauksessaan kuvapohjaisesta mallintamisesta aktiivisten ja passiivisten sensorien käytön yhteydessä neljä toisistaan erotettavaa vaihtoehtoista metodia objektien ja paikkojen mallinnuksessa käytettäväksi. Nämä neljä eri metodia ovat kuvapohjainen havainnollistaminen (IBR, image-based rendering), kuvapohjainen mallintaminen (IBM, image-based modelling), etäisyyspohjainen mallinnus (range-based modelling) sekä yhdistelmämetodi etäisyyspohjaisesta mallinnuksesta ja IBR:stä.

IBR on menetelmä, jota ei käytetä mittatarkkojen kolmiulotteisten mallien tekemiseen, vaan tällä tekniikalla uudelleen luodaan näkymiä kolmiulotteisesta ympäristöstä. Tällä menetelmällä voidaan esimerkiksi luoda panoraamakuvia yhdistämällä yksittäisen kohteen kuvaryhmän kuvat yhdeksi kokonaisuudeksi. IBR on metodi, jonka käyttäminen vaatii joko tarkat tiedot kamerasijainnista kohteen suhteen, tai automaattisen stereoyhteensovituksen tapauksessa suuren joukon voimakkaasti limittäin kohdetta esittävää kuvamateriaalia. Tätä tekniikkaa käytettäessä erityisesti kuvattavan kohteen geometrinen mutkikkuus ja objektien osittainen näkymättömyys ja laaja-alaisuus vaikuttavat lopputulokseen. Yleisesti IBR onkin menetelmä, jota käytetään sovelluksissa, joissa tarpeen on kohteen visualisointi ilman kohteen mittatietojen tuottamista. (Remondino & El-Hakim 2006)

IBM puolestaan on tekniikka, jota käytetään yleisesti tarkkojen kolmiulotteisten mallien luomiseen ympäristöstä, rakennuksista ja muista objekteista (Liebowitz et al. 1999). Tässä menetelmässä hyödynnetään kaksiulotteiselta kuvalta mitattuja tuloksia ja muodostetaan kolmiulotteinen kohde matemaattisen mallin avulla. Vaihtoehtoisesti on mahdollista saada kohteen kolmiulotteinen tilatieto kuvien pohjalta käyttämällä erilaisia laskennallisia menetelmiä, jotka yleensä laskevat kohteen kolmiulotteisen muodon kuvan elementtien, kuten varjostuksen (Prados & Faugeras 2006) tai kohteen tekstuurin avulla (Aloimonos 1988). Mikäli käytössä on passiivinen kuvanottomenetelmä, vaatii IBM-menetelmien käyttö kolmiulotteisten mittojen ottamisen useasta eri näkökulmasta.

Remondinon ja El-Hakimin (2006) esityksen mukaan kolmas metodi, joka pohjautuu etäisyyspohjaiseen mallintamiseen, perustuu suoraan kolmiulotteisen geometrisen tiedon keräämiseen kohteesta aktiivisia sensoreita käyttäen, ja se esitellään luvussa 2.2. Neljännessä menetelmässä yhdistetään sekä IBM- että etäisyysmittauksen piirteitä. Tyypillinen käyttökohde-esimerkki on suurten arkkitehtuuristen kohteiden mallinnus. Tämän kaltaisissa töissä IBM on käytettävä menetelmä mallinnettaessa kohteen suuria linjoja ja piirteitä ja etäisyysmittauksella taltioidaan suurta tarkkuutta vaativia yksityiskohtia.

Kuvapohjainen kolmiulotteinen mallinnus kokonaisuudessaan sisältää useita askelmia. Ensimmäisenä on laite- ja kuvausgeometrian suunnittelu. Tämän jälkeen suoritetaan 3D-mittojen laskeminen kuvamateriaalista. 3D-tietojen laskennassa muodostetaan kuvien kohteita esittävä pistepilvi. Kolmiulotteisen kohdetiedon hankkimisen jälkeen seuraa mallin rakenteellinen muodostus, kuten esimerkiksi kolmioverkon laskeminen ja luonti. Viimeisenä vaiheessa mallinnuksessa on mallin visualisointi ja tekstuurien lisäys. (Remondino & El-Hakim 2006)

Yksi yleinen nimitys menetelmälle, jossa käytetään kuvajoukkoja, ja kohdetta kuvataan useista erillisistä kulmista, on niin sanottu Structure-from-motion (SfM). Toinen perinteisempi menetelmä, jota tässä paperissa ei käsitellä, on mallinnus kiinteältä stereokuvaparilta, joiden keskinäinen etäisyys tunnetaan. SfM-menetelmässä taas on mahdollista, että kuvien ottosijaintitietoja ei ole käytettävissä. (Westoby et al. 2012)

Valokuvapohjaisessa mallinnuksessa voidaan Remondinon ja El-Hakimin (2006) esityksen mukaan erotella kolme erilaista lähestymistapaa. Ensimmäinen menetelmä on tuottaa kohteen 3D-malli kalibroimattomista kuvista automaattisesti. Kun kyseessä ovat kalibroimattomat kuvat, täytyy järjestelmän sisältää automatiikka kuvien kalibrointiin ja orientointiin. Lisäksi kohteen kolmiulotteiset koordinaatit on mitattava kuvilta ja mitattavista pisteistä muodostetaan kolmiulotteinen pistepilvi. Tämän jälkeen luodaan varsinainen malli kohteesta. Kuvaustyössä täytyy huomioida, että kuvasarjan kuvat eivät saa olla liian laajalti hajaantuneet, vaan yksittäiset kohteen piirteet ja selkeästi tunnistettavat yksityiskohdat on katettava useassa sarjan kuvassa. Lyhyt kuvanottoväli on yksi tapa varmistaa automaattisen kuvankäsittelyn onnistuminen. Aineiston keräämisen

jälkeen kuvankäsittelyjärjestelmällä paikannetaan kuvista automaattisesti tunnistettavat tai erityisen kiinnostavat pisteet ja piirteet ja etsitään tunnistettujen elementtien vastaavuudet kuvasarjan muista kuvista. Kiinnostavien pisteiden havainnoinnin jälkeen lasketaan kameran kalibrointi eli kameran parametrit. Usein määritetään ainoastaan kamerassa käytetty polttoväli. Seuraava vaihe on kolmiulotteisen pintamallin tuottaminen. Mikäli kohde on mutkikas tai muutoin yksityiskohdiltaan rikas, suoritetaan lisäpiirteiden tunnistus ja yhdistäminen, jotta kohteesta voidaan luoda syvyyskartta ja sen avulla täydellinen kolmiulotteinen malli.

Toinen lähestymistapa mallinnukseen on puoliautomaattinen menetelmä, jossa käytössä on kalibroidut valokuvat. Tässä menetelmässä kuvien orientointi ja kalibrointi suoritetaan interaktiivisesti, eli ihmisen toimesta. Myös varsinainen mallinnus tapahtuu vain puoliksi automaattisesti, sillä mallinnusoperaatiota seuraa tai sen tuloksen tarkastaa myös ihminen (Gibson et al. 2003). Puoliksi automaattinen mallinnusmenetelmä onkin tällä hetkellä huomattavasti yleisempi menetelmä geometrisesti mutkikkaiden kohteiden mallinnuksessa kuin täysin automaattiset menetelmät. Interaktiivinen osuus työstä sisältää usein topologian määrittystä ja kolmiulotteisen datan esikäsittelyä. Esimerkkinä datan esikäsittelystä on esimerkiksi virhepisteiden tai mallinnettavaan kohteeseen kuulumattomien pisteiden poisto operaation automaattisen osuuden keventämiseksi ja helpottamiseksi. Yksi lähestymistapa on tätä menetelmää käyttäen ensin käyttäjän tekemänä työnä määritellä kohteen yleinen geometrinen muoto ja varsinainen koko. Tämän jälkeen seuraa automatisoitu työvaihe, jossa lisätään kohteen tarkemmat yksityiskohdat. Tämä työtapa on osoittautunut hyväksi menetelmäksi geometrisesti tarkkojen kolmiulotteisten mallien luomisessa. Menetelmän varjopuolena voidaan pitää sen vaatimaa interaktion suurta määrää. (Remondino & El-Hakim 2006)

Kolmas vaihtoehtoinen menetelmä kuvapohjaiseen mallinnukseen käyttää orientoituja kuvia ja automaattista mallinnusprosessia. Tässä menetelmässä kuvien orientaatio ja kalibrointi suoritetaan toisistaan erillisinä toimina ja siihen voidaan käyttää joko automaattisia tai interaktiivisia menetelmiä ja varsinainen kohteen 3D-mallin muodostaminen on täysin automatisoitu työtehtävä. Täysin automaattiset menetelmät käyttävät usein lähestymistapaa, jossa kohteelle asetetaan tiukkoja geometrisiä rajoitteita, jotka on huomioitava mallin muodostuksessa. Tällaisia rajoituksia voi olla esimerkiksi elementtien kohti- ja pystysuoruus, joita todennäköisesti esiintyy esimerkiksi

arkkitehtuurisissa kohteissa. Mahdollista on, että menetelmässä hyödynnetään muodoltaan ennalta määriteltäviä rakennuspalikoita, joista mallinnettava kohde muodostuu. Mallin rakennus tapahtuu joukkona perustasoja, jotka vastaavat kohteen kattoa, seiniä ja muita vastaavia elementtejä (Dick et al. 2001). Nämä elementit puolestaan voivat sisältää poikkeavia kolmiulotteisia muotoja, jotka edustavat arkkitehtonisia elementtejä, kuten ikkunoita ja pylväitä.

Golparvar-Fardin et al. (2011) tutkimus, joka käsittelee kuvapohjaisen mallinnuksen tarkkuutta, esittelee SfM-menetelmän työkulun ja tarkastelee aikaan saatujen tulosten geometristä tarkkuutta verraten mallinnuksen tulosta laserkeilausaineistoon. Kyseisessä tutkimuksessa suoritettiin kuvauksia rakennustyömaalla, sekä hallituissa laboratorio-olosuhteissa rakennuksen sisä- ja ulko-olosuhteissa. Lopullista vertailua varten muodostettiin yhteensä kahdeksan erillistä 3D-mallia joista neljä oli rakennustyömaa- ja neljä laboratorio-olosuhteista otetuista kuvista. Tarkastelun kohteena oli kontrolloiduissa olosuhteissa yksinkertainen betonikuutio ja työmaalla yksittäinen betonipylväs.

Vertailussa ei käytetty objektien metrisiä mittoja, vaan objektien dimensioiden suhteita. Betonikuution tapauksessa sisätilassa suoritettua mittauksen laserkeilausaineistosta lasketut dimensiosuhteet poikkesivat todellisista mittasuhteista noin 0 – 1,5 % ja ulkotiloissa vastaavasti 1,2 – 4,5 %. Vastaavasti kuvilta tehty mallinnustulos ulkomittauksissa poikkesi todellisesta kohteesta 2 – 13 % ja sisätilamittauksissa eroa oli 1 – 10 %. Työmaaolosuhteissa kuvatun betonipylvään kohdalla sisätiloissa laserkeilainmittauksen virheet olivat alle 0,6 % ja ulko-olosuhteissa 1,8 – 2,5 %. Kuvista muodostettujen mittojen poikkeamat sisätiloissa olivat alle 1,3 % ja ulko-olosuhteissa välillä 0 – 12 %. Eri dimensioiden suhteiden sisältämät virheet vaihtelivat suuresti jopa yhden mittaukserran sisällä. Esimerkiksi kuvatunnistus, joka tehtiin ulkotilan betonipylvästä, sisälsi virheitä siten, että dimensioiden x ja y suhde sisälsi 9,54 % virheen, y ja z dimensioiden välisen suhteen virhe oli 11,63 %, sekä suhteen x/z virhe oli 0,4 %. (Golparvar-Fard et al. 2011)

SfM-menetelmää ja laserkeilausta vertaillen Golparvar-Fard et al. (2011) havaitsivat menetelmien välillä seuraavanlaisia eroja. Ajallisesti vaativammaksi todettiin laserkeilaus. Tutkimuksen tapauksessa keilaus kesti kahdeksasta kuuteentoista tuntiin kaikki kohteet yhteenlaskettuna, kun vastaava datan keräys valokuvina vei alle tunnin.

Myöskin laitehintojensa puolesta SfM on kuluttajaystävällinen vaihtoehto, koska kuvaamiseen voi käyttää tavallista edullista kuluttajatasen kameraa ja laserkeilainteknologia puolestaan on taloudellisesti todennäköisesti tavallisen kuluttajan ulottumattomissa. Menetelmien tuloksena saaduista pistepilvistä laserkeilauksella kerätty pisteaineisto oli tiheämpää, mutta myös SfM menetelmällä saadun pistepilven tiheyttä voi kasvattaa, joko kasvattamalla otettujen kuvien määrää tai käyttämällä korkeampi-resoluutioista kameraa kuin tutkimuksessa oli käytössä. Lopullisena päätelmänä Golparvar-Fard et al. (2011) totesivat, että sekä laboratoriotapauksessa että rakennustyömaan tapauksessa valokuvien pohjalta tuotettujen mallien tarkkuus oli alhaisempi kuin vastaavista näkymistä laserkeilaimella kuvattu pistepilvi.

Lehtolan et al. (2014) tutkimuksessa, jossa laserkeilausdataa on hyödynnetty tutkittaessa automaattisten kuvapohjaisten mallinnusmenetelmien tarkkuutta, yhtenä tutkimuksen testikohteena oli toimistorakennus, jossa kuvauksen kohdetilojen muodot, koot ja yksityiskohdat olivat vaihtelevia. Testikohde piti sisällään kapeita käytäviä, läpinäkyviä seinä ja ovirakenteita, sekä avoimia huoneita. Myös kohteen valaisuolosuhteet olivat vaihtelevia tilaan ulkopuolelta vaikuttavan valon vuoksi. Sisätiloissa kuvattiin kahdella eri valokuvauskameralla (Canon EOS 60D ja Nikon D800E) käyttäen kahta eri kuvaresoluutiota. Vertailuaineisto puolestaan kerättiin käyttämällä Faro Focus<sup>3D</sup> laserkeilainta. Valokuvista tehdyssä mallinnustyössä käytössä oli SfM-menetelmää hyödyntävä ohjelma Bundler.

Tulosten tarkastelu osoitti, että verrattaessa Faro Focus<sup>3D</sup> laserkeilaimella tuotettuun pistepilveen, Nikonin kameralla otetuista kuvista muodostetussa pisteistössä suurempi osa asettuu pienemmän virhemarginaalin sisään, kuin Canonilla kuvatuista kuvista tehdyssä mallinnuksessa. Tuloksista selvisi myös, että Nikonin kameralla otettujen valokuvien pohjalta automaattisesti sisätiloista luodun kolmiulotteisen mallin pisteistöstä noin 70 % sijaitsi 5 senttimetrin virhemarginaalin sisäpuolella. Nikonin kameralla otettujen kuvien pohjalta tehdyn mallinnuksen tarkkuuteen vaikutti kameran stabiili sisäinen orientaatio. Tutkimuksessa todettiin automaattisen mallinnusmenetelmän olevankin käyttökelpoinen sovelluksissa, joissa kyseinen mittatarkkuus on riittävä. (Lehtola et al. 2014)

## 2.2 Laserkeilaimella hankittava 3D-tilatieto

Kuten luvussa yksi todettiin, tässä työssä keskitytään ei-kontaktillisiin menetelmin kerättyyn kolmiulotteiseen dataan ja sen mallintamiseen. Yksi mainituista tiedon keräämiseen käytetyistä aktiivisista menetelmistä on laserkeilaus.

Laserkeilaus on menetelmä, jolla voidaan tallentaa ympäristöä tiheänä ja tarkkana kolmiulotteisena pisteistönä. Keilaamalla saadaan nopeasti kerättyä hyvin suurienkin kohteiden geometriset tiedot. Laserkeilaus menetelmänä on joustava, ja sillä voidaan kerätä kolmiulotteista pistetietoa lähes millaisesta ympäristöstä tahansa. Keilattavasta kohteesta saatava pistedata kuvaa niin rakennuksien, maaston kuin kasvillisuudenkin yksityiskohtia millimetritarkkuudella. (Arayici 2007)

Remondinon ja El-Hakimin (2006) esittelemä etäisyyspohjainen mallintaminen hyödyntää aktiivisia sensoreita, joihin myös laserkeilaimet kuuluvat. Näiden sensoreiden toiminta perustuu sensorin itsensä tuottamaan valoon. Etäisyys valon lähteestä eli kuvauslaitteesta voidaan laskea ajasta, joka valolla kestää kulkea edestakaisin kuvauslaitteen ja kohteen välillä. Etäisyys kohteen ja kuvauslaitteen välillä saadaan laskemalla  $r = t * c/2$ , missä  $r$  on etäisyys kohteen ja sensorin välillä,  $c$  on valonnopeus ja  $t$  on aika, joka valolta kestää kulkea edestakaisin kohteen ja sensorin välillä. Tämän tyyppisten sensorien kohdalla epävarmuustekijöiksi muodostuvat muun muassa kohteen pinnan heijastuksen ominaisuudet, sekä välineiden käyttäjän asiantuntemuksen vaatimukset eri teknologioita käytettäessä.

Kirjoittamassaan artikkelissa Remondino ja El-Hakim (2006) esittävät, että tuolloin suurin osa etäisyyttä mittaavista järjestelmistä keskittyi kolmiulotteisen geometrian lisäksi tallentamaan ainoastaan monokromaattisen intensiteettiarvon kullekin etäisyydelle. Tämän vuoksi osaan laitteista oli liitettyä värikamera, joten samalla saatiin taltioitua myös kohteen pintojen tekstuuri, mutta realistisen kolmiulotteisen mallin aikaansaamiseksi jouduttiin usein tarkempi tekstuuritieto tallentamaan erillisillä korkearesoluutioisilla kameroilla. Digitaalisten kameroiden resoluution kehityksestä esimerkkinä toimivat Nikonin D1, D200 ja D800 kamerat. Kameroiden julkaisuvuodet ja kuvan maksimiresoluutiot ovat nähtävinä taulukosta (Taulukko 1).

Taulukko 1 Nikon D1, D200 ja D800 -kameroiden julkaisuvuodet ja kuvaresoluutiot. (Askey, Nikon D200, Diallo et al.)

	Julkaisuvuosi	Kuvan maksimiresoluutio (pikseliä)
D1	1999	2000 x 1312
D200	2005	3872 x 2592
D800	2012	7360 x 4912

Laserkeilainteknologialla on potentiaalia olla ratkaisu ongelmiin, joita on yhdistetty jo olemassa olevien rakennuksien liittyvään suunnitteluun ja rakentamiseen. Laserkeilaus mahdollistaa esimerkiksi täydennysrakennusprojekteissa olemassa olevien rakenteiden tarkan kartoittamisen ja mallintamisen. Tätä tietoa voidaan käyttää täydennysrakennussuunnittelussa tai täydennysrakentamisessa. Laserkeilaus tarjoaa perinteisestä valokuvapohjaisesta mallintamisesta poikkeavan työmenetelmän, jolla saadaan kerättyä tiheää ja geometrisesti tarkkaa tilatietoa ympäristöstä. Muita mahdollisia käyttökohteita kolmiulotteisille malleille löytyy muun muassa pelastustoimen suunnittelussa, videopeliteollisuudessa ja luonnonkatastrofien tai onnettomuuksien jälkeisessä jälleenrakennuksen suunnittelussa. Jotkin näistä käyttöalueista ovat mahdollistuneet laajemmin vasta laserkeilauksen myötä. (Hähnel et al. 2003, Arayici 2007)

Rakennetusta ympäristöstä laserkeilainten käyttö mahdollistaa ympäristön digitaalisen dokumentoinnin ilman valokuvapohjaisten menetelmien vaatimaa kohteiden piirteiden tunnistamista ja kolmiulotteisen pisteistön laskutyötä. Tekniikka mahdollistaa potentiaalisesti riskejä sisältävien alueiden kuvaamisen ilman henkilövaaraa, jos hyödynnetään tekniikkaa jossa keilain liitetään kauko-ohjattavaan tai autonomiseen mobiilialustaan. (Arayici 2007, Hähnel et al. 2003)

Maalaserkeilaus kuuluu 2000-luvun alun tutkituimpien työmenetelmien joukkoon. Maalaserkeilaimet ovat usein käytettyjä rakennetun ja luonnonympäristön datan hankkimiseen, koska datan hankintanopeus ja tuotettu datatiheys, eli kohdetta kuvaavan kolmiulotteisen pistejoukon tiheys, on suuri. Menetelmän etuna on sen joustavuus ja datan muokattavuus käyttötarpeen mukaan. Esimerkkinä erilaisista tilanteiden asettamista vaatimuksista on tuotevalvonta, jossa objektien geometrinen tarkkuus on olennainen vaatimus. Toinen mahdollinen käyttötarkoitus, jossa geometrinen tarkkuus ei ole olennaista, mutta vaaditaan suurta kohteen visuaalista tarkkuutta, on virtuaaliturismi. (Bornaz et al. 2003, Arayici 2007)

Kuten aina ympäristöä taltioidessa, täytyy eri menetelmien yhteydessä pohtia niiden tuottaman datan laatua ja laserkeilauksen tapauksessa useita keilauskertoja vaativien kohteiden keilausdatajoukkojen yhdistämistä. Datan laatua voidaan helposti tarkastella kahdesta eri näkökulmasta. Näin tarkastelun kohteena on datan tarkkuus ja käytettävyys. Eri laitteiden tapauksissa laitteiden valmistajat ilmoittavat tuotteidensa metriset tarkkuudet usein mittauksissa syntyvien systemaattisten virheiden sekä mittaustulosten keskihajonnan suuruuksina. Nykypäivänä valmistajien ilmoittamat virheet ovatkin usein millimetriluokkaa, kun keilausalueet ja -etäisyydet ovat kyseisten laitteiden ilmoitetuilla käyttöalueilla. Hyvä esimerkki nykypäivän laserkeilaimen mittausetäisyyksistä ja tarkkuuksista on esimerkiksi Faro Focus<sup>3D</sup> 120, jolle valmistaja ilmoittaa toimintaetäisyydeksi 120 metriä ja tähän etäisyyteen asti systemaattiseksi virheeksi  $\pm 2$  millimetriä. (Bornaz et al. 2003, Faro Focus<sup>3D</sup> Features, Benefits & Technical Specifications)

Mittausdatan laadusta puhuttaessa ja mittarina käytettävyyttä tarkastellessa yksi dataan liittyvistä aiheista on datan määrä. Koska laserkeilaimella saatava pistetieto on tiheydeltään suurta, tarkoittaa tämä tiedon tallentamisen kannalta suurta tallennuskapasiteetin tarvetta. Vielä 2000-luvun alkuvuosina tämä oli kysymys, joka liittyi oleellisesti laserkeilauksen mielekkyyteen ja käytettävyyteen menetelmänä. Vaikka teknologian yleinen kehitys on viimeisen vuosikymmenen aikana tuonut markkinoille aina vain suurempien datamäärien tallettamiseen tarkoitettuja medioita ja tietotekniikan kehitys tarjoaa tehokkaampia työvälineitä myös datan käsittelyyn, on myös keilainteknologia kehittynyt. Tämä johtaa siihen, että nykypäivänä datamääriin liittyen ratkaistavana ovat edelleen samat kysymykset ja ongelmat kuin aikaisemminkin. Yhtenä pysyvänä ja tärkeänä tehtävänä onkin tasapainon löytäminen datan tarkkuuden ja käytettävyyden vaatimusten välillä. (Bornaz et al. 2003)

Erityisesti suurten kohteiden keilaamistyössä kysymykseksi nousee myös työn vaatimien useiden erillisten keilauskertojen määrä ja näiden yksittäisten otosten yhdistäminen. Yksittäisiin kuvauksiin liittyviä ratkaistavia kysymyksiä on muun muassa laitesijaintien jakautuminen kuvausalueella siten, että kohteesta ei jää näkymättömiin tärkeitä yksityiskohtia. Myös riittävän suuri keilausotosten päällekkäisyys tulee saavuttaa, jotta yksittäisotosten yhdistämisessä vältetään systemaattisten virheiden syntymiseltä. Tämä



vaatii onnistuakseen päällekkäisyyden lisäksi riittävästi sellaisia piirteitä tai elementtejä kuvattavassa ympäristössä joiden sijainti pysyy kiinteänä ja jotka ovat selkeästi tunnistettavissa erillisistä keilausaineistoista. Yhdistämistyön vaatimat ympäristö-elementit on mahdollista luoda keinotekoisesti käyttämällä muodoltaan joka kulmasta katsottuna homogeenisiä ja pintamateriaaliltaan heijastavia kohteita tai tähyksiä. Yleisesti käytettyjä ratkaisuja ovat pallon muotoiset heijastavapintaiset tähykset tai mustavalkoiset shakkilaudan muotoon piirretyt pinnoille kiinnitettävät tunnisteet. Tällaisia referenssi-kohteita pitäisi pyrkiä sijoittamaan keilattavalle alueelle siten, että jokainen yksittäinen keilaus sisältäisi vähintään kolme referenssiä. Lisäksi on varmistettava, että yhdistettävät materiaalit sisältävät riittävän useita yhteisiä referenssielementtejä. Myös tässä tapauksessa pistepilviparin pitäisi sisältää vähintään kolme yhteistä referenssikohdetta. (Bornaz et al. 2003)

Arayicin (2007) tutkimuksesta käy ilmi, että maalaserkeilaus on toimiva työmenetelmä rakennetun ympäristön mallinnusdatan keräämiseen. Keilaamalla hankittua pistepilvitietoa on mahdollista mallintaa niin interaktiivisesti kuin automaattisestikin. Olemassa olevat ohjelmat tarjoavat laajan valikoiman erilaisia menetelmiä erilaiset tapauskohtaiset vaatimukset tyydyttäen. Vaikka automaattinen mallinnus onkin mahdollista, tutkimuksissa silti todetaan, että monimutkaisten kohteiden tapauksissa automatisoiduin menetelmin ei saavuteta täysin luotettavia tuloksia.

Maalaserkeilauksella hankitusta datasta mallintamisesta Pu ja Vosselman (2009) toteavat, että työmenetelmän hitaus ja materiaalien rekisteröinti eli yhdistämisprosessi ovat pitkään olleet työprosessin pullonkauloja. Menetelmien ja välineiden kehityksen myötä ympäristön tiedon keräämisen nopeutuminen ja rekisteröinnin muuttuminen puoliautomaattiseksi on kuitenkin tuonut tähän muutosta.

### 2.3 Syvyyskameroiden käyttö ympäristön mallinnuksen välineenä

Eräs vasta viime vuosina kuluttajamarkkinoilla yleistynyt datankeruuvälineryhmä on syvyyskamerat. Microsoftin valmistama Kinect on yksi esimerkki edullisesti saatavilla olevista kuluttajatasen syvyyskameroista.

Syvyyskamerat tarjoavat kohtuullisen yksinkertaisen työvälineen sisätilaympäristöjen mallinnusdatan keräämisvälineiden joukkoon. Värikuvia tuottavia ja syvyystietoa

tallentavia kameroita kutsutaan RGB-D -kameroiksi. Kyseessä on tekniikka, jossa järjestelmä tallentaa yhtäaikaaisesti RGB-kuvaa, sekä pikselittäistä syvyystietoa kohteesta. Myös tämän kaltaista teknologiaa on mahdollista käyttää kolmiulotteisen kartoituksen tai mallinnuksen datan hankkimiseen. RGB-D -kameroiden käyttö kolmiulotteisen ympäristön kuvaamisessa on herättänyt kiinnostusta, koska tiheän syvyystiedon tuottaminen ainoastaan kameradataa käyttäen, erityisesti hämärissä tai harvatekstuurisissa olosuhteissa, on hyvin vaikeaa. Vaikka tekniikan toteuttaminen on ollut mahdollista jo vuosien ajan, vasta viime aikoina on teknologia kehittynyt suuntaan, jossa syvyyskameroita voidaan valmistaa siten, että ne koetaan kiinnostavaksi tutkimuslaitteistoksi myös tietokonenäköön erikoistuneiden yhteisöjen ulkopuolella. (Henry et al. 2012)

RGB-D -kameroiden käytön suurin rajoittava tekijä kartoituksessa on mitattavan etäisyyden suuruus. Usein syvyystiedon luotettava saanti rajoittuu korkeintaan viiden metrin päähän kamerasta, joka on vain murto-osa laserkeilaimella kuvattavasta etäisyydestä (Henry et al. 2012). Edullisten kuluttajille suunnattujen kameroiden kohdalla kameroiden näkemäetäisyys on todennäköisesti vielä rajatumpi ja Xbox-tuen internet sivuilla kameran suositelluksi etäisyydeksi havainnoitavasta kohteesta järjestelmää käyttöönottaessa on 1,4 tai 1,8 metriä käyttötilanteesta riippuen (Set up your Kinect play space for Xbox One).

Syvyyskameroiden näkökenttä on yleensä huomattavasti rajatumpi kuin esimerkiksi laserkeilaimella tai laajakulmakuvaukseen erityisesti suunnitelluilla kameroilla, joita yleisesti käytetään kolmiulotteisen kartoituksen datan keräämiseen. (Du et al. 2011)

RGB-D -kamera on havaintoväline jonka syvyystiedon tallentaminen perustuu joko aktiivisen stereon menetelmään, jossa esimerkiksi voidaan heijastaa kohteen pintaan tekstuuri tunnistustyön helpottamiseksi (Konolige 2010), tai niin sanottuun time-of-flight -tunnistukseen. Aktiivisen stereon menetelmässä kohteen etäisyys kamerasta lasketaan kuvaparista tai -ryhmistä, jotka on kuvattu vähintään kahdesta keskenään poikkeavasta laitesijainnista, ja joiden keskinäinen asemointi tunnetaan. Time-of-flight -tunnistusmenetelmässä puolestaan etäisyyden mittausta perustuu valon kulun kestoon kameran ja kohteen välillä. (Henry et al. 2012)

Langmann et al. (2012) vertasivat tutkimuksessaan Kinect-kameraa viimeisimmän teknologian mukaisiin time-of-flight -syvyyskameroihin. Kyseisessä tutkimuksessa vertailun kohteena oli kaksi PMDTec:n kameraa, CamCube 41k ja 3k-S. Kinect-kameran syvyyshavainnot perustuvat laitteen itsensä tuottamaan pistekuvioon kohteen pinnalle. Pisteen etäisyys kamerasta lasketaan lähetetyn pisteen ja pinnalle muodostuvan pisteen sijaintien välimatkasta. Jotta tämä on mahdollista, käytetyn heijastuskuvien yksittäisille pisteille on voitava tunnistaa vastine kohteen pinnalle heijastetusta kuvioista. Tämän vuoksi epäsäännöllistä pistekuviota käytettäessä pisteen tunnistus on varmempaa ja kohteen etäisyyslaskenta luotetumpaa. Kameran kuvaamat etäisyysmitat esittävät etäisyyttä kuvitteelliseen vertailutasoon, ei varsinaiseen kameran polttopisteeseen. Vertailussa käytetyt kamerat puolestaan laskevat etäisyyttä tuottamansa infrapuna-aaltojen vaihe-eroista lähetetyn ja vastaanotetun aallonvaiheen välillä. Koeobjekteina oli kaksi Böhlerin tähteä (Boehler et al. 2003), joiden halkaisija oli 20 senttimetriä. Kuvion avulla Langmann et al. (2012) tutkivat kuviorajojen havainnointiresoluutiota. Lisäksi käytössä oli kaksi muuta pintatekstuurltaan vaihtelevaa tasoa, joilla testattiin etäisyyserojen havainnoinnin tarkkuutta. (Langmann et al. 2012)

Vaikka tutkimus osoitti Kinectin tuottaman syvyystiedon olevan laadullisesti epätarkempaa kuin muilla testissä olleilla kameroilla, uskoivat tutkimuksen tekijät kaikkien kameroiden olevan potentiaalisia välineitä sisätilojen kuvaamiseen etenkin lyhyillä välimatkoilla. Sen sijaan pitkiä etäisyyksiä mitatessa, tai ulkoilmaolosuhteissa Time-of-Flight -kamerat vaikuttivat olevan parempi ratkaisu. (Langmann et al. 2012)

Kuten jo edellisessä kappaleessa mainittiin, Henryn et al. (2012) sekä Langmannin et al. (2012) tutkimukset osoittavat, että sisätiloissa syvyyskameralla kuvatusta datasta on mahdollista muodostaa ympäristöä kohtuullisen tarkasti kuvaava kolmiulotteinen malli. Tätä näkökantaa vahvistaa myös Dun et al. (2011) tutkimus interaktiivisesta syvyyskamerajärjestelmästä.

Haasteita mallinnukselle muodostavat rajoittuneet tai äkillisesti vaihtelevat valaisuolosuhteet, selkeästi tunnistettavien piirteiden puute kuvattavalla alueella ja toistuvat tekstuurit. Kohteelta vaaditaan runsasta yksityiskohtaisuutta, jotta kohteen sijainti kyetään mittaamaan kauttaaltaan. Koska kuluttajille suunnattu erityisesti peli- ja viihdekäytössä oleva teknologia on hinnaltaan alhaista, on syvyyskamerateknologian

tutkimisessa kiinnitetty huomiota myös näihin edullisempiin saatavilla oleviin laitteisiin. Tehdyssä tutkimuksessa käy kuitenkin ilmi, ettei edullisilla kuluttajakameroilla saada sellaista kuvadataa tai syvyysdataa, joissa puhtaasti jommallakummalla onnistuttaisiin yhdistämään yksittäisiä kuvauskertoja etäisyystarkkuudellisesti hyväksi kokonaisuudeksi (Henry et al. 2012).

Toisaalta Dun et al. (2011) julkaisusta käy ilmi, että syvyyskameralla tehtävää kartoitusta suoritettaessa reaaliaikaisesti ja esimerkiksi verkon yli käyttäjän ohjaamana voidaan ratkaista monia kolmiulotteiseen kartoitukseen liittyviä ongelmia. Yksi tällainen kysymys on yksittäisten kuvausten yhdistäminen kokonaisuudeksi. Mikäli kuvausta ja kuvien yhdistämistä voidaan seurata reaaliaikaisesti kuvausten edetessä, interaktio kuvausjärjestelmän kanssa kuvausten kuluessa mahdollistaa yksittäisen kuvamateriaalin epäonnistuessa kuvauksen suorittamisen halutulta alueelta uudestaan. Näin voidaan varmistaa kuvattavan kohteen datan kokonaisvaltainen saanti, ja ettei kuvamateriaalin yhtenäisyydessä tule ongelmia datan jatkokäsittelyvaiheessa. Samalla tavoin voidaan varmistaa kuvadatan kattavuus halutussa kuvauskohteessa, sekä syvyystiedon riittävä kohteenkattavuustiheys. Korkea datatiheys mahdollistaa ympäristön yksityiskohtien kartoittamisen tai mallintamisen.

Tutkimuksissa esitetään, että lähitulevaisuudessa on mahdollista rakentaa henkilökohtaisia kolmiulotteisia kartoitusvälineitä. Kuluttajatasen syvyyskamerat ja interaktiivinen reaaliaikainen kartoitus tarjoaakin valtavaa potentiaalia mahdollistaa kompakteja henkilökohtaisia kuluttajakäyttöön tarkoitettuja mobiileja laitteita, jotka mahdollistavat henkilökohtaisen kolmiulotteisen tilan kartoittamisen. (Du et al. 2011)

### 3 Mallinnuskohde ja välineet

#### 3.1 Kuvauskohde – Startup Sauna

Kuvauskohteeksi valittiin Espoon Otaniemessä Aalto-yliopiston kampuksella sijaitseva Startup Sauna (Kuva 3.1). Startup Sauna edustaa uudenlaista työskentelytilaa ja -konseptia. Tämä ja tilan monipuolinen rakenne ja yksityiskohdat tekevät siitä kiinnostavan kuvauskohteen. (Startup Sauna)



Kuva 3.1 Otaniemen Startup Saunan sisäänkäynti.

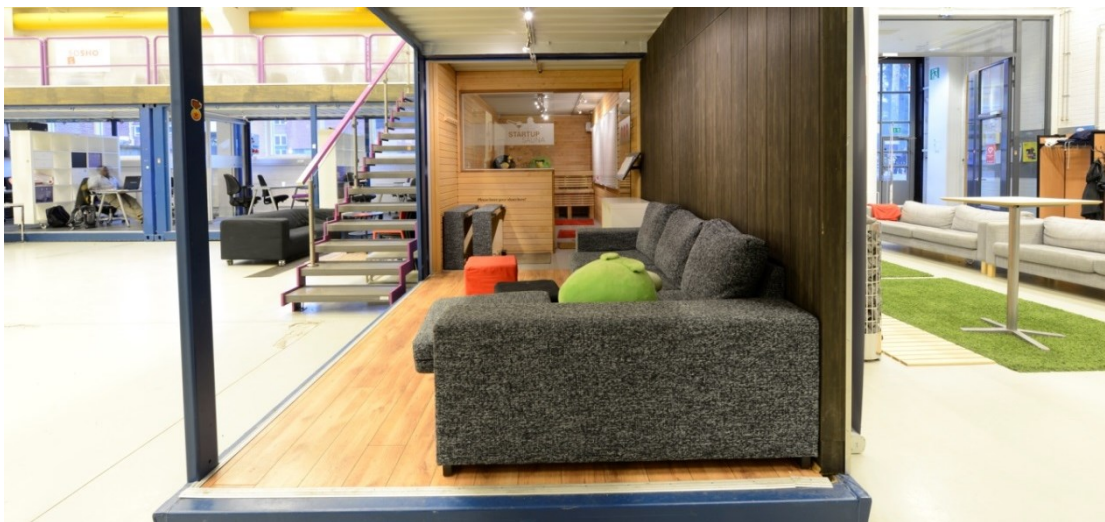
Kyseinen tila on vain yksi Startup Sauna -säätön toimintapaikoista. Säätöillä on toimintaa yli kahdessakymmenessä kaupungissa Pohjoismaissa, Itä-Euroopassa ja Venäjällä. Säätön toiminnan tarkoituksena on luoda ympäristö, joka tukee toiminta-alueiden startup-yritysten syntymistä ja menestymistä.

Otaniemessä sijaitseva tila on kyseisen säätön toimintapiste Espoossa ja se on noin 1500 neliömetrin kokoinen teollisuushalli, joka on uusittu palvelemaan tilaisuuksien järjestämistä, ja toimimaan tapaamispaikkana ja työskentelytilana sellaisia tarvitseville. Tilan päähalli on jaettu useaan osaan, jotka palvelevat vaihtelevia tilankäyttötarpeita. Sisäänkäynti avautuu miellyttävän kokoiseksi rennompaan oleskeluun soveltuvaksi tilaksi ja keittiöksi (Kuva 3.2), jotka ovat kooltaan noin kolmasosa hallin pinta-alasta.



Kuva 3.2 Startup Saunan tila ulko-ovelta kuvattuna. Keittiö sijaitsee kuvan vasemmassa reunassa.

Hallin sisäänkäyntipäädyn tilassa sijaitsee enemmän oleskeluun ja rentoutumiseen tarkoitettu varustelu ja kalustus. Oleskelutilan muusta hallista erottaa halliin sijoitettu kuljetuskontti, johon on rakennettu saunaa muistuttava kokoustila (Kuva 3.3).



Kuva 3.3 Hallin tilaa jakava kokoustilaksi muunnettu kuljetuskontti. Oikealla sijaitsee tilan sisäänkäynti.

Hallin loput kaksi kolmasosaa on selkeästi varattu pääsääntöisesti työskentelytiloiksi ja on varusteltu työpöydin ja tuolein sekä vapaasti liikuteltavin sermein, joilla tilaa halutessa voidaan jakaa osiin käyttötarpeen mukaan. Hallin seinustalle on rakennettu useita pienehköjä lasiseinin tai huonekaluin toisistaan eroteltuja alkoveja, joissa on työskentelytilaa pienille ryhmille. Alkovien ja saunakontin päälle on rakennettu parvi, jolla on lisää pöytätilaa sitä kaipaaville (Kuva 3.4). Päähallin lisäksi rakennuksesta löytyy erillisiä pienempiä kokoushuoneita, sekä luentosali.



Kuva 3.4 Hallin työskentelytiloja kuvattuna hallin perältä. Vasemmalla alkovit ja parvi.

Kuvattavaksi valittiin ainoastaan Startup Saunan päähalli, koska katsottiin, ettei rakenteeltaan yksinkertaisten sivuhuoneiden mallinnus ole tarkoituksenmukaista. Kiinnostavaksi kuvauskohteeksi Startup Saunan teki hallin rakenne. Tilasta löytyy pieniä ja ahtaita alueita, sekä erikokoisia aukeita osia. Myös parvi ja parvelta avautuva koko hallin kattava näkymä vaikuttivat suuresti tilan kuvaamisen suunnittelun



kiinnostavuuteen. Yksityiskohtaisemmin kuvausten suunnittelusta on luvussa 3.3.1. Kuvauksessa haasteeksi koettiin myös tilan suuri irtaimiston määrä, sekä hallin seinillä ja katossa sijaitsevat rakennuselementit, kuten tilaa kiertävät putkistot.

### 3.2 Välineiden ja ohjelmien esittely

Tässä luvussa esitellään työssä käytettävän kuvaus- ja mittausvälineet, sekä kerätyn datan käsittelyyn ja analysoimiseen käytettävät ohjelmistot. Laserkeilainten joukosta Faro Focus<sup>3D</sup> edustaa uusimman sukupolven yleisesti käytössä olevaa tekniikkaa. Matterport puolestaan, vaikka teknologiana onkin jo tunnetumpaa, on tuotekonseptina tuore idea syvyyskameradatan hyödyntämisestä. Kameravalmistajan tarjoama kuvankäsittely ja mallin tuottaminen perustuu SaaS-konseptille (Software as a Service), jossa tuotteen valmistaja tarjoaa ohjelmaa käytettäväksi internetin yli esimerkiksi selaimessa. Matterport on tuotteena suunniteltu erityisesti sisätilojen mallinnustyössä käytettäväksi välineeksi. Valokuvat puolestaan edustavat perinteistä tekniikkaa, mutta kuvamateriaalien käsittelyyn käytettävät ohjelmistot taas uusinta laskentakonseptia. Näin valitut menetelmät kattavat ympäristön mallinnuksen olemassa olevat suuntaukset sekä edustavat niiden viimeisintä sukupolvea.

#### 3.2.1 Laserkeilain – Faro Focus<sup>3D</sup>

Faro Focus<sup>3D</sup> (Kuva 3.5) on nopea, kolmiulotteista pistedataa keräävä keilain.



Kuva 3.5 Faro Focus<sup>3D</sup>

Faro Focus<sup>3D</sup> käyttää etäisyyksien mittaamiseen teknologiaa, jossa laite lähettää jatkuvasti kuvattavaan kohteeseen infrapunasäteitä usealla aallonpituudella ja etäisyys

voidaan laskea palaavan infrapuna-aallon vaiheiden perusteella. Laserin lisäksi keilain on varustettu kameralla, jolla keilattava ympäristö kuvataan värikuvoin, jotta mittauksen tuloksena saadut kohteen pistepilvet voidaan niin halutessa esittää kohteen alkuperäisin värein.

Keilaimen maksimitoimintaetäisyydeksi valmistaja ilmoittaa 120 metriä ja tähän etäisyyteen asti systemaattiseksi pistehavaintovirheeksi  $\pm 2$  millimetriä (Faro Focus<sup>3D</sup> Features, Benefits & Technical Specifications). Työssä käytössä oleva laserkeilain on hankinnan aikaan vuonna 2012 maksanut 53 700 euroa ilman arvonlisäveroa. Keilaimen lisäksi keilaustyössä käytettävät kaksitoista tähystä ovat maksaneet yhteensä noin 1 500 euroa.

### 3.2.2 Matterport

Matterport on ympäristön taltioimiseen suunniteltu tuotekokonaisuus, joka on tarkoitettu erilaisten sisätilojen kuvaamiseen ja kolmiulotteisten mallien luomista varten. Matterportin tarjoama tuote ei keskity ainoastaan kuvaamisessa käytettävään välineistöön, vaan kyseessä on niin sanottu end-to-end -tuote, joka sisältää kaikki kolmiulotteisen mallin luomiseen vaadittavat osat. Osana tuotepakettia on Matterportin pilvipalvelu jonne käyttäjä lataa keräämänsä kuva-aineiston. Kuvausmateriaalien siirron jälkeen kuvattua aineistosta luodaan kuvattua kohdetta esittävä kolmiulotteinen malli. Tämän jälkeen malli on palveluun rekisteröityneen käyttäjän ladattavissa ja tarkasteltavissa Matterportin portaalissa (<https://my.matterport.com>).



Kuva 3.6 Matterport-kamera



Matterportin teknologia koostuu useasta osatekijästä. Ensimmäinen osa teknologiaa on kuvamateriaalin keräämiseen käytettävä Matterport Pro 3D kamera. Kuvassa (Kuva 3.6) nähtävä kamera on vuonna 2014 maksanut noin 3 700 euroa ja tämän summan lisäksi kuluttajalle tulee maksettavaksi kameran arvonlisävero. Kameran ohjaamista varten käyttäjällä tulee olla myös iPad-tablettitietokone, joka on varusteltu Matterportin tähän tarkoitukseen laaditulla ohjelmalla.

Kameran lisäksi teknologian osiksi lasketaan jo edellä mainitut mallien tuottamiseen käytettävä pilvipalvelu, sekä portaali, jonka kautta malleja voi tarkastella, tai halutessa myös jakaa muiden palvelun käyttäjien kesken internetselainta käyttäen. Kyseinen portaali sisältää katseluohjelman, jolla valmista mallia voi tarkastella vapaasti haluamastaan näkökulmasta. Näihin vaihtoehtoihin kuuluu muun muassa mahdollisuus kulkea mallissa sisällä ja kokea kuvattu tila katselukulmasta, joka vastaa kuvatussa tilassa kameran kuvaushetken näkymää. Lisäksi mallin tarkastelu on mahdollista niin kutsutussa nukkekotinäkymässä, jossa kuvattua kohdetta voi tarkastella laajemmasta näkökulmasta. Matterportin tarjoaman palvelupaketin kuukausikustannukset vaihtelevat 49 ja 149 dollarin välillä riippuen siitä haluaako kuluttaja käyttöönsä Basic-, Business- vai Professional-paketin. Lisäksi esimerkiksi Basic-paketin ostajat joutuvat maksamaan myös tehtävistä malleista mallikohtaisen maksun, joka on 19 dollaria. Osa palvelupaketeista kuuluu rajattu määrä kuukausittaisia ilman erillisveloitusta tehtäviä malleja.

### 3.2.3 Valokuvauskamera - Nikon D800E

Työssä käytetyt valokuvat otettiin Nikonin D800E kameraa (Kuva 3.7) käyttäen. Kamerassa käytössä on 35,9 x 24,0 millimetriä mitoiltaan oleva CMOS-sensori. Kameran maksimikuvaresoluutio on 7360 x 4912 pikseliä. Koska haluttiin varmistaa kohteen tunnistettavien piirteiden tallentaminen ja yksittäisten kuvien mahdollisimman laaja kattavuus kuvattavasta tilasta, käytössä oli myös laajakulmaobjektiivi.

Valokuvauksessa menetelmän kustannukset koostuvat pääosin kamerasta, jonka vuoksi kustannuksien rajoista on helppo kuluttajan päättää itse. Tässä työssä käytetty kuvan (Kuva 3.7) mukainen Nikon D800E -kamera on hankittu vuonna 2012 ja sen hinta on silloin ollut ilman arvonlisäveroa noin 2 500 euroa.



Kuva 3.7 Nikon D800E laajakuvaojektiivilla varusteltuna.

### 3.2.4 Käytettävät ohjelmistot

Laserkeilausaineiston käsittelyyn käytetty ohjelma oli Faro SCENE, joka on suunniteltu erityisesti Faro Focus<sup>3D</sup> laserkeilaimella tuotetun aineiston käsittelyyn. Kyseisen ohjelman tuottamisesta vastaa Faro-yhtiö, jolta tuote on ostettavissa.

Valokuvien käsittelyä varten käytössä on 123D Catch, joka on tarkoitettu kolmiulotteisten mallien luomiseen valokuvien pohjalta. Ohjelma on maksutta saatavilla ei-kaupallista käyttöä varten ja on mahdollista saada niin Android, iPhone, iPad kuin PC alustoille. Koska alustavan tutustumisen perusteella ilmeni, että 123D Catch on suunniteltu lähinnä erilaisten yksittäisten objektien, ei niinkään tilojen mallintamiseen, valittiin kuvien käsittelyä varten vaihtoehdoksi myös ohjelmapari VisualSFM ja SURE. (Wu, Rothermel & Wenzel)

VisualSFM on vapaasti käytettävä ohjelma, joka perustuu viimeisimpään tutkimustietoon edustamastaan aihepiiristä. Ohjelma automaattisesti havaitsee valokuvilta kohteiden erilaisia yksilöiviä piirteitä, ryhmittelee työssä käytettävät kuvat havaittujen piirteiden perusteella ja luo kolmiulotteisen pisteistön kuvien esittämästä kohteesta. Ohjelman on laatinut Changchang Wu. (Wu)

Myös SURE on ilmainen ohjelma ei-kaupalliseen käyttöön hyödynnettynä. Sen laatijoita ovat Mathias Rothermel ja Konrad Wenzel Stuttgartin yliopistosta. SURE-ohjelmalla voi muodostaa kuvasarjaa esittävästä kohteesta tiheän pistepilven, kun käytössä on

kuvaryhmän orientaatiotiedot, jotka tämän työn tapauksessa saadaan VisualSFM:llä tehdyn kuvaryhmittelyn ja pistemäärittelyn seurauksena. (Wu, Rothermel & Wenzel)

Eri menetelmin tuotettujen tulosten tarkasteluun ja vertailuun mahdollisia käytettäviä ohjelmia olivat CloudCompare ja Geomagic Qualify. Näistä kahdesta CloudCompare on vapaan lähdekoodin periaatteella tuotettu ohjelma ja Geomagic Qualify Geomagic-yhtiön kaupallinen tuote. CloudCompare on alun perin suunniteltu työvälineeksi kolmiulotteisten pistepilvien keskinäiseen vertaamiseen tai pistepilven vertaamista kolmioverkkomallin kanssa. Ohjelma on suunniteltu erityisesti käsittelemään suuria pistepilviä, jotka sisältävät yli 10 miljoonaa pistettä ja joiden tallentaminen vaatii jopa 2 gigatavua muistia. Ohjelma mahdollistaa muun muassa pistepilven pohjalta käsiteltävästä objektista pintamallin muodostamisen, sekä muita välineitä objektien käsittelyyn ja tutkimiseen. Tämän työn kannalta kiinnostavin työväline on kuitenkin erilaisten pistepilvien ja mallien keskinäinen vertailu. Vastaavasti tässä työssä hyödynnettäviä ominaisuuksia Geomagic Qualifyssä ovat erilaisten pistepilvien ja mallien vertailuun ja tutkimiseen käytettävät työkalut.

## 4 Tulokset

### 4.1 Datan keruu

#### 4.1.1 Kuvausten suunnittelu ja aikataulu

Koska kuvattavaksi kohteeksi valittiin tila, johon ihmisillä on vapaa pääsy kuvausajankohtina, pyrittiin kuvausajat valitsemaan siten, että paikalla oli mahdollisimman vähän ihmisiä. Käytännössä tämä tarkoitti kuvausten aloittamista mahdollisimman varhain heti tilan avauduttua. Eri menetelmien kuvausten eteneminen pyrittiin myös suunnittelemaan siten, että kohteen aktiivisimmin käytössä olevat alueet kuvattiin ennen runsainta käyttäjämäärän saapumista. Kuvaussuunnitelmissa pyrittiin huomioimaan tilan ja sen objektien maksimaalinen näkyvyys ja minimoimaan mahdolliset katvealueet.

Koska tila on jatkuvan käytön kohteena ja sisältää paljon liikuteltavia elementtejä, täytyi datan keruu suorittaa siten, että koko kohde saatiin taltioitua ajallisesti mahdollisimman tiiviisti. Kaikilla menetelmillä kuvauksia ei kuitenkaan pystytty varmistamaan tehtäväksi saman päivän aikana, joten kuvaukset jaettiin alustavasti kahdelle eri päivälle ja varauduttiin myös mahdollisten lisäpäivien tarpeeseen. Suunnitelman yhteydessä ennakoitiin, että laserkeilaus tulee viemään todennäköisesti eniten työaika, joten ensimmäinen kokonainen kuvauspäivä varattiin kohteen keilaamiselle. Toiselle kuvauspäivälle jätettiin kuvaaminen Matterportilla ja perinteisellä kameralla. Jälkimmäisenä suunniteltuna kuvauspäivänä Matterport-kuvaukset oli tarkoitus suorittaa ensimmäisenä ja tämän jälkeen valokuvata perinteisellä menetelmällä, mikäli tilan käyttöaste niin sallisi.

Kuvaukset saatiin suoritettua suunnitellulla tavalla, mutta ensimmäisen valokuvasarjan heikon kuvausgeometrian ja valaisuolosuhteiden vuoksi tila valokuvattiin toistamiseen alkuperäisestä suunnitelmasta poikkeavana ajankohtana. Työssä käytetyt valokuvat ovat jälkimmäisellä kuvauskerralla otettuja. Laserkeilauksen ja Matterport-kuvauksen data saatiin molemmissa tapauksissa kerättyä yksittäisillä suunnitellun mukaisilla kuvauskerroilla. Eri menetelmiin käytetyt työtunnit on koottu yhteen eri menetelmien vaatimien työmäärien vertailun helpottamiseksi (Taulukko 2).

Taulukko 2 Eri menetelmien työaikoja (arvio uudelleen tehtävästä kerralla onnistuvasta työstä).

	Datan keräämisen kesto	Datan käsittelyn kesto
Laserkeilaus	6 (5-6) tuntia	25-30 (15-20) tuntia
Matterport, syvyyskamera	5 (3-4) tuntia	5-6 (5-6) tuntia
Perinteiset valokuvat	3-4 (1-1,5)tuntia	10-15 (7-10) tuntia

Taulukossa (Taulukko 2) sulkuihin merkityt tuntimäärät ovat arvioita työn kestosta, mikäli työ suoritettaisiin uudelleen hyödyntäen ensimmäisen työkerran tuottamaa osaamista. Arviossa on oletuksena työn onnistuminen kertakuvauksilla ja datan käsittelyn olevan sujuvampaa kuin ensimmäisellä työkerralla. Laserkeilaus ja Matterport-kuvaus eivät todennäköisesti sujuisi ratkaisevasti nopeammin, koska työn aikana näissä kuvausvaiheissa ei kuvausta hidastavien tekijöiden annettu vaikuttaa kuvaus-tapahtumaan. Matterport-kuvauksen tapauksessa olisi ollut mahdollista välttää joitain työn aikana tapahtuneita uudelleenkuvaustilanteita, jotka johtuivat kamera-asemien muutosten liian pitkistä välimatkoista. Valokuvauksen vaatima aika muuttuisi suhteessa eniten, koska kuvauskertoja olisi vain yksi. Laserkeilauksen datan käsittelyn vaatima aika olisi ollut jopa mahdollista puolittaa, kun ei olisi tarvetta opetella ennestään tuntemattomien ohjelmien toimintaa. Automaattisesti suoritettavien töiden vaatima aika pysyisi kuitenkin ennallaan. Matterportin vaatima datan käsittelyn kesto ei muuttuisi, koska pilvipalveluun ladattavan datan määrä ei ratkaisevasti muuttuisi. On mahdollista, että kuvattava tila kuvattaisiin kattavammin kuin työn tapauksessa, jolloin tiedonsiirron vaatima aika kasvaisi. Valokuvien käsittelyn tapauksessa työstä jäisi pois yhden sopimattoman menetelmän kokeilu, mikä lyhentäisi käsittelyn kestoja. Automaattista pistepilven tuottamista ei kuitenkaan pystytä nopeuttamaan, mikäli käytettävien kuvien resoluutiota ei laskettaisi työssä käytetystä kuvaresoluutiosta tai käytettävien kuvien määrää vähennettäisi.

Laserkeilauksen datan käsittelyyn kuluva ajasta noin puolet oli automaattista työtä. Toinen puolisko koostui aineiston manuaalisesta käsittelystä ja sisälsi automaattisten työvaiheiden tulosten tarkastusta ja pistepilvien muokkausta. Datan käsittelystä kerrotaan tarkemmin luvussa 4.2.1.

Matterport-kuvauksen kohdalla kuvauksen ja datan käsittelyn vaatimaa aikaa on vaikea tarkasti erotella, mutta arviolta kuvausten ajasta noin tunti kului aineiston merkitsemiseen

ja rajaamiseen. Taulukossa (Taulukko 2) Matterportin osalta datan käsittelyn vaatima aika on täysin automaattisen työvaiheen keston arvio ja sisälsi kuvausten datan lataamiseen Matterportin pilvipalveluun. Matterport-menetelmän vaatimat käsittelytyöt on mahdollista tehdä jo kuvausten aikana, joten datan keräämistä ja käsittelyä ei tässä tapauksessa voi selkeästi erotella toisistaan. Lisäksi tulee muistaa, että taulukossa ei ole esitetty sitä aikaa, joka kuluu mallin muodostukseen pilvipalvelussa. Tehdyn työn tapauksessa materiaali sisälsi noin yhdeksänkymmentä erillistä kuvausta ja sen pilveen lataamiseen kului noin viisi tuntia. Tarkasta mallin valmistumisajasta ei ole tietoa. Materiaalin lataamisaikaan kuitenkin vaikuttaa mallin sisältämien yksittäisten kuvausten määrä ja verkko, jonka yli materiaalia pilveen ladataan. Tämä työvaiheen kesto on siis kullekin projektille yksilöllinen.

Datan keräämiseen kuluneista työtunneista valokuvauksen osalta voidaan todeta, että käytettävä kuvausaika olisi puolittunut ja datan käsittelyaika lyhentynyt noin kolmanneksella, mikäli kuvattava kohde ei olisi ollut vapaasti ulkopuolisten henkilöiden käytettävissä. Taulukosta (Taulukko 2) ilmenevästä ajasta huomattavan suuri osa seuraa tilassa liikkuvien ihmisten liikehinnän loppumisen odottamisesta. Valokuvaamiseen käytetty aika jakaantui kahden eri kuvauskerran välille, koska ensimmäinen tuotettu kuvasarja ei ollut mallinnukseen soveltuva. Onnistunut valokuvaus vei noin kaksi työtuntia. Valokuvien tuottamisesta kerrotaan tarkemmin luvussa 4.1.4

Materiaalien käsittely suoritettiin valokuvien tapauksessa automatisoidusti ja työtuntien kertymästä osa johtuu kuvamateriaalin määrän suuruudesta. Mikäli kuvaresoluutiot ja kuvamäärät olisi osattu optimoida jo kuvausvaiheessa, olisi työaikaa voitu vähentää noin kolmellakymmenellä prosentilla. Interaktiivista työaikaa ilmoitettu tuntimäärä ei mallinnuksen osalta sisältänyt oikeastaan lainkaan, ja oheistyöt kuten kuvien tallennusmedioiden välinen siirto ja ohjelmien hankinta ja toimintavalmiiksi saattaminen veivät vain kahdesta kolmeen tuntia, eikä sitä ole laskettu lainkaan datan käsittelyn työaikaan. Noin viidesosa käsittelyn viemästä ajasta kului ensimmäisen epäonnistuneen kuvasarjan mallinnuskelpoisuuden testaamisesta. Kuvien käsittelystä on kerrottu tarkemmin luvussa 4.2.3.

Koska kuvauksia eri menetelmin suoritettiin eri päivinä, on mallien yksityiskohtien välillä odotettavissa poikkeamia, mutta tilan merkityksellisempien ominaisuuksien ja piirteiden pitäisi olla vertauskelpoisesti edustettuna kussakin datajoukossa.

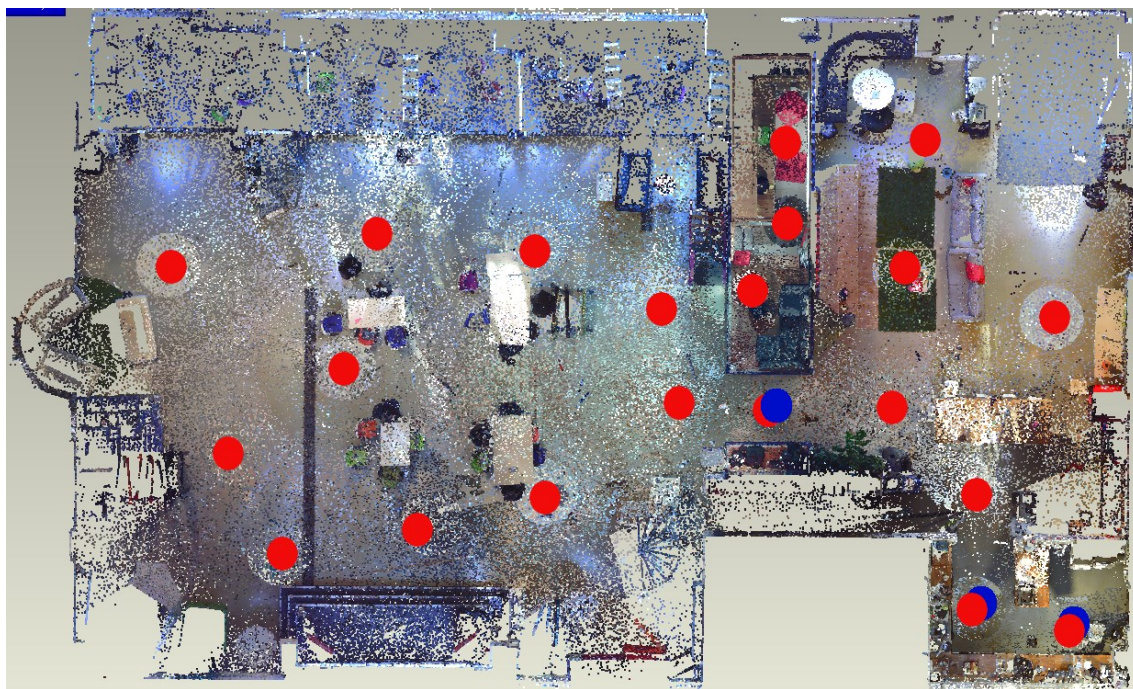
#### 4.1.2 Laserkeilaus

Laserkeilauksen suunnittelussa huomiota kiinnitettiin erityisesti tilan katvealueiden minimoimiseen kuitenkin siten, että kustakin laiteasemasta pyrittiin saavuttamaan mahdollisimman laaja näkyvyys keilattavaan tilaan. Keilauksen suunnitteluun kuului myös keilausaineiston jälkikäsitteilyn yhteydessä tehtävän aineistojen yhdistämisen vaatimien tähysten asettelu tilaan. Tilan suuren koon vuoksi tähyksiä jouduttiin siirtämään keilaustyön aikana. Tämän seurauksena tilan keilaaminen suunniteltiin osakokonaisuuksina tehtäväksi. Kaikkiaan suunnitelmallisesti tila jaettiin neljään osaan; näkymään hallin perällä, jossa sijaitsi suurin tilapinta-ala ja muokattavuus, parven keilaamiseen, kontin sisäpuolen keilaamiseen, sekä sisääntulotilan ja keittiön keilaamiseen.

Keilaus aloitettiin hallin perältä, joka tilallisesti kattoi suurimman pinta-alan kuvattavasta tilasta. Kuvattavalta alueelta valittiin osa tähyssijainneista siten, että niille oli näkyvyys mahdollisuuksien mukaan jokaisesta, mutta vähintään kahdesta erillisestä edellä esitellystä tilan osasta. Näin pyrittiin varmistamaan yksittäisten keilauskertojen aineistojen yhdistettävyyttä. Näiden pysyvien tähyssijaintien lisäksi tilaan sijoitettiin myös muita tähyksiä. Hallin perältä siirryttäessä keilaamaan sisääntulotilaa ja keittiötä uudelleensijoitettiin hallin peräosasta sellaiset tähykset työn alla olevaan osatilaan, joiden alkuperäinen sijaintipaikka ei ollut nähtävissä keilaamattomista tilan osista. Samalla tavoin ja samoin kriteerein aina tilan eri osaan siirryttäessä tehtiin tarpeellinen tähysten uudelleensijoittelu.

Keilauksen aikana kysymyksiä keilauksen onnistumisesta herättivät muun muassa tilanteet, joissa koko tilan keilauksen ajaksi pysyviksi suunniteltuja tähyssijainteja ei saatu pysymään staattisina, vaan tähykset liikkuivat sijaintipaikoiltaan tilaa käyttävien ihmisten vaikutuksesta. Tähysten poistamisen kohteesta katsottiin vaikuttavan kuitenkin lähinnä vain keilauspilvien yhdistämiseen, joten mahdolliset ongelmat käsiteltäisiin ja ratkaistaisiin vasta datan jatkokäsittelyn yhteydessä. Lisäksi keilauksen aikana kasvava käyttäjämäärä tilassa vaikutti tilan sisäisten objektien paikallaanpysyvyyteen, mutta myös tämän katsottiin olevan datan käsittelyllä ratkaistava ongelma. Myös tilan runsas irtto-objektien ja näköesteiden määrä sai pohtimaan keilaussuunnitelman kattavuutta, mutta lopulta hyväksyttiin se, ettei tilasta tehdyn suunnitelman mukaisilla keilauskerroilla saada kohdetta sataprosenttisesti kattavaa pistedataa. Toteutetun keilauksen laitesijainnit tilan

ensimmäisessä kerroksessa on nähtävissä kuvasta (Kuva 4.1), jossa punaiset ja siniset merkit edustavat keilainsijainteja. Kohdista, joissa esiintyy päällekkäiset merkit (punainen ja sininen), keilattiin kahdesti. Keittiössä (kuvan oikea alanurkka) kuvattiin kahdelta eri laitekorkeudelta, jotta kyettiin varmistamaan ahtaassa tilassa myös lattiatason kattava pisteistö. Kontin luona päällekkäiset keilausasemat valittiin, jotta pystyttiin varmistamaan siirrettyjen tähysten näkyvyys eri vaiheissa keilausta. Kuvassa näkyvien laitesijaintien lisäksi tilan parvelle sijoitettiin neljä erillistä keilauspistettä.



Kuva 4.1 Keilainsijainnit tilan alakerrassa.

Tilan keilaaminen vei yhteensä noin kuusi tuntia ja yksittäisiä keilainsijainteja ja näin ollen yksittäisiä pisteaineistoja oli yhteensä kaksikymmentäkahdeksan kappaletta.

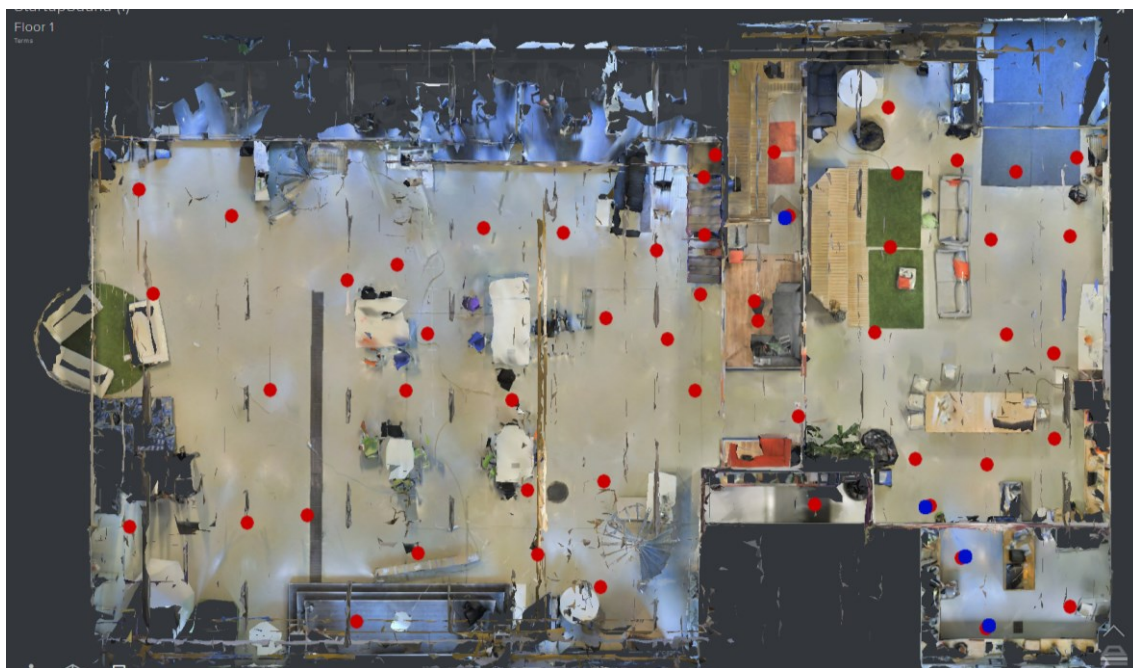
#### 4.1.3 Matterport

Kamera ja kameraa ohjaava tablettisovellus, jotka esiteltiin luvussa 3.2.2, olivat molemmat kohtuullisen intuitiivisia käyttöominaisuuksiltaan. Lisäksi Matterportin kotisivuilla on saatavilla kameran käyttäjälle opas kuvaamisen tueksi. Kyseinen käyttäjän oppaassa käsitellään kuvaamisen vaatima välineistö, sekä opastetaan kuvausten suorittamisessa varsin kattavasti. (Matterport 3D capture app 2.0 - User guide)

Kuvauksen suunnittelussa on huomioitava samat asiat kuin laserkeilaimella tehtävissä kuvauksissa. Matterportilla kuvatessa ei kuitenkaan tarvita laserkeilauksessa käytettäviä tähyksiä tai muita ulkoisia tunnistusapuja. Kuvausten kameran sijainnit ja kameran siirrot



on suunniteltava etukäteen siten, että kamerasijainteja on riittävän tiheään, koska kameran kuvausetaisyys on melko lyhyt. Kuvausohjeissa neuvotaankin valitsemaan kameran sijainnit siten, että niiden väli olisi korkeintaan noin 3,5 metriä. Kameraa siirrettäessä täytyy huomioda, että perättäisiltä kuvauspaikoilta näkyy riittävästi yhteisiä tunnistettavia kohteita, pisteitä tai tasoja, joissa on selkeästi yksilöiviä piirteitä, jotta ne voidaan yhdistää samaan sijaintiin. Jos kuvattujen ympäristöjen yhteisiä piirteitä ei voida tunnistaa riittävällä varmuudella, ei kuvattua materiaalia voida liittää olemassa olevaan kuvausmateriaaliin. Perättäisten kamerasijaintien välillä tulisi aina olla suora näköyhteys. Tästä vaatimuksesta johtuen Matterport-kameralla laitesijainnit ja kuvausjärjestys täytyy suunnitella hieman tarkemmin kuin laserkeilauksessa, missä keilainsijaintien valintaan vaikuttaa lähinnä kohteen kokonaisvaltaisen näkyvyyden kattavuuden saavuttaminen.



Kuva 4.2 Matterport-kamerapaikat tilan pohjakerroksessa.

Ero laitesijaintien lukumäärässä laserkeilauksen ja Matterport-kuvauksen välillä korostuu sellaisissa tiloissa, joissa on suuria näkyvyydeltään esteettömiä alueita. Kapeissa päätyvissä tiloissa Matterportilla joudutaan kuvaamaan edestakaisin, mikäli koko kuvausta ei voi päättää kapean tilan päähän. Tämä johtuu siitä, että yksittäinen tehty kuvaus sidotaan aina edelliseen tehtyyn kuva-aineistoon. Esimerkiksi T:n muotoisessa käytävässä ainakin yksi haara joudutaan siis kuvaamaan käytännössä kahdesti, jotta T:n viimeinenkin sakara saataisiin kuvattua kokonaisuudessaan. Alueet, joilla on runsaasti näköesteitä, tai monimutkaisia objekteja, vaativat luonnollisesti tiheimmin sijoiteltuja kamerasijainteja, jotta saadaan kuvattua objektien ympäri. Kuvasta (Kuva 4.2) voidaan

tarkastella Matterport-kameran sijoituspaikkoja tilan pohjakerroksessa. Kamerapaikka on merkitty kuvaan punaisella pisteellä. Siniset pisteet ovat kamerasijainteja, jotka olivat välttämättömiä kuvauksen eheydelle kapeissa ja umpinaisissa tilan kohdissa. Kuvassa näkyvien kamera-asemien lisäksi tilan parvella oli hieman yli kymmenen kuvaussijaintia.

Startup Saunan hallin kuvaus vaati noin 90 eri kuvauskertaa hieman yli seitsemästäkymmenestä laitesijainnista. Laiteasemien määrä oli hieman yli kaksinkertainen verrattaessa laitesijaintien määrään laserkeilauksen tapauksessa.

#### 4.1.4 Valokuvat

Kohteen valokuvaamisessa pyrittiin kuvaamaan kohde siten, että kuvauksissa saavutettaisiin mahdollisimman hyvä kuvausgeometria. Tämän lisäksi pyrittiin huomioimaan käytettävien ohjelmistojen asettamia vaatimuksia kuvien ja kuvasarjojen laadulle ja sisällölle. 123D Catch -ohjelman käytön asettamiin vaatimuksiin kuului muun muassa se, että kuvien valaisuolojen tuli pysyä mahdollisimman tasaisena läpi koko kuvauksen keston ja kuvattavan alueen. Lisäksi kuvattavan kohteen sijainnillinen muuttumattomuus oli tavoiteltavaa. Tämä luonnollisesti vapaasti käytettävässä tilassa vaati kuvauksen ajallisen toteutuksen siten, että läsnä oli mahdollisimman vähän tilaa muuttavia elementtejä, tässä tapauksessa ihmisiä.

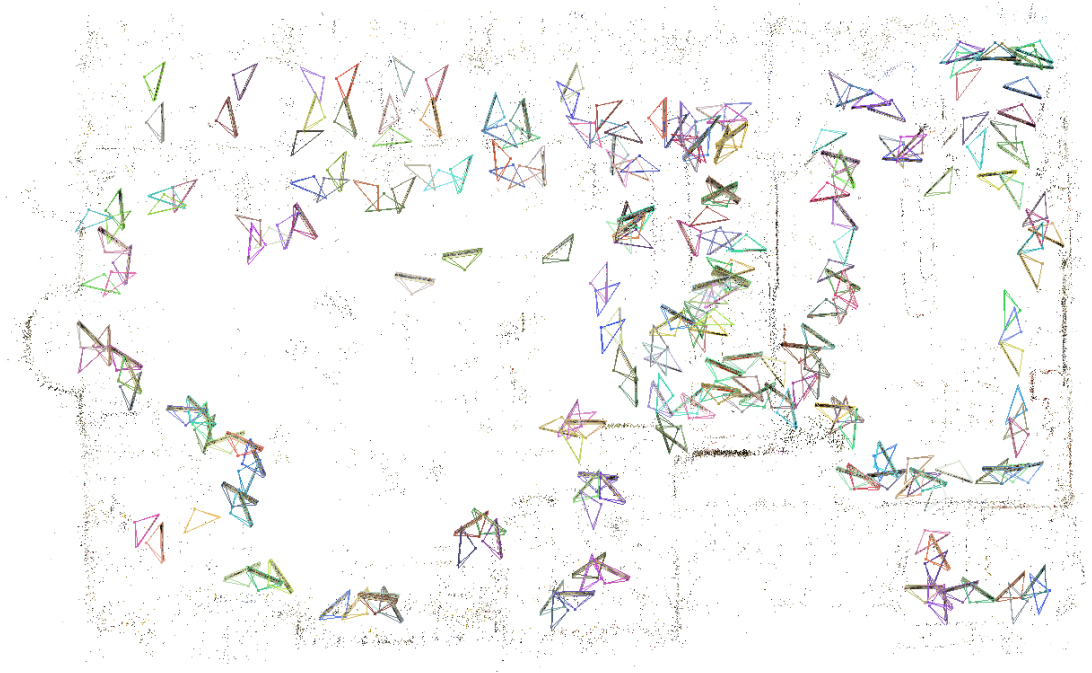
Tilan valokuvaaminen vaati ajallisesti yllättävän kauan. Ajallista suunnittelua varten oli huomioitava kohteen monimutkaisuus ja laajuus, sekä kuvaukselle häiriölliset tekijät. Valitun kohteen tapauksessa tila sisälsi runsaasti elementtejä ja irto-objekteja, jotka loivat paljon katvepaikkoja, ja näin valokuvien määrällinen tarve oli suurempi kuin vastaavan kokoisessa objektiyhemmässä tilassa olisi ollut. Myös tilan suuri koko loi haastetta kuvausgeometrian suunnittelussa, jotta kuvilla saavutettaisiin mallintamisen vaatima kattavuus kohteesta.

Ensimmäinen hankittu kuvasarja ei ollut sovelias automatisoituun mallinnukseen. Suurimpana ongelmana oli kuvausgeometrian heikkous. Tämän lisäksi kuvaushetkellä kohteen valaisuolosuhteet eivät pysyneet stabiileina, mikä vaikutti kuvien laatuun ja liian suuriin eroavaisuuksiin kuvien tunnistettavien piirteiden välillä jolloin tilan elementtien

ja objektien automaattinen tunnistaminen kuvilta ei ollut mahdollista. Myös kuvauskohteen irtainten objektien sijaintien muutokset kuvauksen aikana heikensivät kuvasarjan laatua.

Mallinnuksessa käytetty toisella kuvauskerralla tuotettu kuvasarja kuvattiin Nikon D800E kameraa ja laajakuvaobjektiivia käyttäen. Näin pyrittiin takaamaan alueen mahdollisimman laaja kattavuus ja kuvien näkymien päällekkäisyys eri kohteista. Kuvatessa käytettiin kiinteää aukon kokoa, mutta valotusaika vaihteli tilan valoisuuden mukaan. Tällä pyrittiin tasaamaan kohteen valoisuusolosuhteiden eroavaisuuksia kuvien välillä.

Tilan kuvaus toteutettiin siten, että kukin tilan osa kierrettiin seinustoja pitkin kuvaten aina tilan toista laitaa kohden. Kustakin kuvauspisteestä pyrittiin ottamaan useampia kuvia. Kuvauksia suoritettiin sekä tilan maantasosta sekä parvelta. Valokuvauksen kuvausgeometriasta käsityksen voi saada kuvien käsittelyn ensivaiheen esityksen VisualSFM-ohjelmasta otetusta kuvasta (Kuva 4.3). Kyseisessä kuvassa on nähtävillä kuvausgeometria ylhäältäpäin katsottuna, mutta eri kerroksissa suoritettut kuvaukset eivät erotu kuvan mukaisessa näkymässä toisistaan. Kuvassa oleva visuaalinen esitys kamerasijainneista ja kuvaussuunnista saadaan pistepilven muodostamisen yhteydessä VisualSFM-ohjelmalla.



**Kuva 4.3** Valokuvauksen kuvausgeometria ylhäältäpäin katsottuna.

Tilan eri kerroksissa suoritettujen kuvausten geometriaa selventää kuvausgeometrian esitys sivusuunnasta katsottuna (Kuva 4.4).



**Kuva 4.4 Valokuvauksen kuvausgeometria sivultapäin katsottuna.**

Molemmissa kuvissa (Kuva 4.3 ja Kuva 4.4) vasemmassa laidassa sijaitsee hallin avoimempi osa ja oikeassa sisääntulo- ja keittiötilat. Hallin avoimemman osan kuvausgeometriaa olisi voitu parantaa kuvaamalla kuvissa esiintyvän geometrian lisäksi avoimen tilan keskeltä tilan ulkoseiniä kohden. Kuvat esittävät jälkimmäisen kuvauskerran kuvausgeometriaa.

Ongelmia tuotti tilan monimutkaisuus ja irto-objektien määrä, mistä seurasi, ettei tilaa ja sen objekteja saatu taltioitua siten, että olisi saavutettu täydellinen esteetön näkyvyys kaikkialle tilaan. Kuvat otettiin 7360x4912 resoluutiolla, joka oli suurin mahdollinen käytetyllä välineistöllä.

## 4.2 Datan käsittely

### 4.2.1 Laserkeilaus

Kun kerättyä laserkeilausdataa tarkasteltiin ennen datan käsittelyä, erillisten keilausten piste-esitysnäkymistä selvisi, että ihmissilmälle läpinäkyvät tai läpikuultavat kohteet keilain havaitsee vain osittain, ja jotkin pisteet havaitaan kohteen läpi. Läpinäkyvissä kohteissa muodostui näin pisteiden sijaintien vääristymiä sekä kohteeseen alueita joissa läpinäkyvää pintaa ei ollut pisteistössä lainkaan edustettuna.

Runsas irto-objektien määrä aiheutti paljon pieniä alueita, joihin yksittäisten keilausten kohdalla syntyi näkyvyydellisesti katveisia alueita. Kaikkia näitä katvealueita ei pystytty täysin eliminoimaan edes yhdistettyjen keilausten muodostamasta pistepilvestä. Ihmisten liikkuminen tilassa aiheutti myös häiriötä keilausaineistoon. Intensiteettikuvissa näkyy osittain epäselviä ihmishahmoja, mutta vastaavasta yksittäisen keilausten

pistepilvestä ei välttämättä pystytty erottamaan ja poistamaan ihmishahmoa edustavia pisteitä. Tämä aiheutti kokonaispistetietoon satunnaispisteitä, jotka rikkovat lopullisen pisteistön selkeyttä. Osassa häiriöelementtejä havaittiin, että varsinainen kolmiulotteinen pistetiedosto ei välttämättä sisällä virhe-elementtiä edustavia pisteitä. Tasokuvissa näkyvät osittaiset tai vääristyneet ihmishahmot johtuvat pistetiedon ja kuvan vääristystä varten otettavan kuvatiedon eriaikaisesta tallentamisesta, kun näiden tallentamisajankohtien välillä kuvausalueelle on saapunut epästabiili objekti. Useimmissa tapauksissa kyseessä on ollut alueella oleskellut tai sen läpi kävelevä henkilö. Keilattavan kohteen sisäisten häiriötekijöiden aiheuttamien virheiden lisäksi pistetiedostot sisälsivät myös kohteen ulkopuolisia pisteitä, joista osa oli puhtaasti virheellisiä ja osa sellaisia objekteja edustavia joita ei haluttu sisällyttää käsiteltävään pistepilveen. Näitä ei-haluttuja pisteitä olivat yleisesti kaikki tilan ulkopuoliset pisteet, kuten ikkunoiden läpi havaitut ulkokohteet. Virheellisiä pisteitä syntyi myös lasersäteiden heijastuksen seurauksena, jolloin pisteen etäisyydeksi saatiin todellisuutta pidempi matka. Tällaisia pisteitä esiintyi aineistossa selkeinä yksittäisinä tilan ulkopuolisina pisteinä.

Pistetiedostojen käsittelyssä aluksi kustakin yksittäisestä keilauksen pistepilvestä poistettiin pisteistöä, joka muodostui halutun mittauskohteen rajojen ulkopuolelle. Tällaisia alueita olivat mm. ikkunoista ja avoimista oviaukoista saatuja mittauspisteitä. Tämä pisteiden poistolla tarkoituksena oli poistaa vain kaikkein ilmeisimmät mittausalueen rajat ylittävät pisteet. Hyvin lähellä rajaa olevien pisteiden annettiin jäädä pilveen ja niiden poisto oli tarkoitus suorittaa erillisten keilauspistepilvien yhdistämisen jälkeen. Yksittäisten kuvien käsittelyn syynä oli muun muassa aineiston testikäsitteilyn aikana ilmenneitä virheellisiä tähyshavaintoja halutun mittausalueen ulkopuolella. Manuaalisella pisteiden poistolla näitä automaattisen havaitsemisvaiheen virheitä haluttiin vähentää ja automaattisia keilauspilvien yhdistämis- ja tähyksentunnistusprosesseja keventää.

Ensimmäisten pisteiden poiston jälkeen kaikille kuville tehtiin pisteiden suodatus hajapisteiden ja mustien pisteiden poistamiseksi. Molempien suodatusten tarkoituksena on poistaa yksittäisiä pisteitä, jotka ovat virheellisiä mittaushavaintoja. Suodatusten lisäksi samalla kaikista keilauspisteistöistä paikannettiin automaattisesti mittauksissa referensseinä käytetyt tähykset aineistojen yhdistämistä varten. Tämän jälkeen erillisten

keilauskertojen tasokuvilta tarkastettiin, että kaikki havaitut tähykset ovat oikeita kohteita ja poistettiin virheelliset tähyshavainnot aineistosta.

Seuraavassa vaiheessa erilliset keilausaineistot yhdistettiin yhdeksi pistepilveksi. Yhdistyksen jälkeen aineistosta rajattiin pois lisää ylimääräistä pistetietoa alueilta joita ei haluttu mukaan materiaaliin. Jonkin verran ylimääräisiä pisteitä jäi alueen rajoille, koska ei haluttu poistaa vahingossa kuvatulle kohteelle relevantteja pistejoukkoja. Erityisen haasteelliseksi käsiteltäväksi yksityiskohdaksi keilattavassa tilassa osoittautui kuvauskohteen yksittäinen seinä, joka koostui suurelta osin osittain läpinäkyvistä lasitiilistä (Kuva 4.5). Tämä aiheutti pisteiden sijainnin vääristymiä ja pisteiden hajoamista pinnalla, jonka olisi kuulunut olla tasainen elementti. Oletuksena onkin, että lopulliseen pistepilveen tältä osin tulee epätarkkuuksia. Epätarkkuutta ja ylimääräisiä ja virheellisiä pisteitä voi odottaa myös muualla tilassa, jossa oli kaiderakenteita tehty sumeasti läpinäkyvästä materiaalista. Samalla tavoin ylimääräisiä tai virheellisiä pisteitä voi olettaa jäävän myös niihin kohti kuvausalueen rajaa joissa sijaitsi ikkunoita tai avoimia oviaukkoja.



Kuva 4.5 Tilassa sijaitseva lasitiiliseinä väritettynä pistepilvenä.

Keilauksen aikana tilassa liikkui myös ihmisiä joiden oletetaan aiheuttavan pistetietoihin mahdollisia vääristymiä, mutta tätä analysoidaan tarkemmin, kun tarkastellaan lopullista pistepilveä luvussa 4.3.1.

Lopuksi keilauksen tuloksena aikaansaadusta pistepilvestä muodostettiin harvennettu pilvi, jota oli tarkoitus käyttää vertailtaessa lopputulosta Matterportilla kuvattuun lopputulokseen. Harvennettu pistepilvi sisälsi noin kymmenesosan alkuperäisen pistepilven pisteistä. Alkuperäisessä pilvessä oli yhteensä noin 800 miljoonaa ja harvennetussa pilvessä noin 80 miljoonaa pistettä.

#### 4.2.2 Matterport

Kuten jo aiemmin luvussa 3.2.2 kerrottiin, Matterportin palvelu on niin kutsuttu end-to-end tuote. Tämä tarkoittaa käytännössä, että Matterportilla kuvatessa käyttäjä itse ei suorita varsinaista datan käsittelyä, vaan kuvattu materiaali ladataan Matterportin verkkopalveluun, josta valmis malli kohteesta on myöhemmin ladattavissa. Käyttäjän mahdollisuudet vaikuttaa lopulliseen malliin rajoittuvat kuvausten hallintaan, sekä kuvatun materiaalin rajaamiseen jolloin määritellään kuvatusta aineistosta se osa, joka halutaan lopulliseen malliin.

Aineiston rajaamisen lisäksi on kuvattuun materiaaliin mahdollista merkitä ja luokitella erilaisia elementtejä, kuten ikkunoiden ja peilien sijainteja ja rakennusten kerrosten vaihtuminen. Kuvausmateriaalin rajaaminen ja elementtien luokittelu tehdään kameran ohjaamiseen käytetyllä applikaatiolla ennen kuin kuvattu materiaali ladataan käsiteltäväksi Matterportin pilvipalveluun. Yhdestä kuvatusta materiaaalipaketista on mahdollista tuottaa useita malleja ja eri malleihin on mahdollista rajata mallinnettava materiaali uudelleen eri mallinnusten välillä.

#### 4.2.3 Valokuvat

Mallinnuksessa käytettäville valokuville ei tehty erillistä kalibrointia. Näin aikaansaadut mallit ovat tarkkuudellisesti sellaisia, joita vähäisellä aiheen tuntemuksella varustautunut kuluttaja voi odottaa tuottavansa.

Valokuvista mallinnus aloitettiin 123D Catch -ohjelmalla. Tämä ohjelma pyrkii tunnistamaan annetusta kuvaryhmän kuvista yhteneviä piirteitä ja määrittelemään näiden avulla kuvista kohteelle kolmiulotteisen pisteistön, johon pohjautuen ohjelma luo automaattisesti kolmiulotteisen mallin kuvauksen kohteesta. Ohjelmaan voi kerralla ladata käsiteltäväksi vain seitsemänkymmentä kuvaa, joten kohteen ollessa suuri piti kuvaaminen ja mallinnus suunnitella osissa, jotka yhdistettäisiin jatkokäsittelyssä eri ohjelmaa käyttäen. Ohjelman soveltuvuutta ja toimivuutta testattiin yhden osatilan kuvasarjalla kahta eri kuvaresoluutiota käyttäen. Kuten luvussa 4.3.3 esiteltävistä tuloksista voi nähdä, kuvien koesarjoista aikaansaadut mallit osoittivat, ettei 123D Catch ole sovelias työväline valitun kohteen kaltaisen tilan mallintamiseen.



Toisena vaihtoehtona valokuvista mallintamiseen käytössä oli ohjelmapari VisualSFM ja SURE. VisualSFM ohjelmalla tarkoituksena oli rakentaa kuvien perusteella ympäristöstä harva pistepilvi, jonka tihennys tapahtuisi SURE-ohjelmalla. Ensimmäisessä vaiheessa kuvien lataamisen jälkeen VisualSFM käy annetut kuvat läpi ja ryhmittelee kuvat niissä esiintyvien piirteiden perusteella. Kuvien ryhmittelyn jälkeen ohjelma automaattisesti laskee kohdeobjekteja edustavien pisteiden kolmiulotteiset sijainnit ja luo näistä pisteistä kolmiulotteisen pistepilven. Käsittelyvaiheessa tilan kartoittajan ja mallintajan rooli työssä on kohtuullisen passiivinen, sillä molemmat käytettävät ohjelmat on suunniteltu suorittamaan kuvien tunnistus ja pisteistön luonti automaattisesti.

Ensimmäisessä testissä käytössä olivat otetut valokuvat käsittelemättöminä ja kuvien suuren resoluution ja määrän seurauksena VisualSFM ohjelman vaatima muistin määrä johti ohjelman kaatumiseen käytettävän muistin riittämättömyydestä johtuen. Toisessa testissä valittiin käytettäväksi pienempi joukko valokuvia, jonka myötä havaittiin, että eniten muistia vievä osuus on kuvien lataaminen haluttuun projektiin. Myös VisualSFM ohjelman ohjeistuksen (Wu) mukaan käytettävien kuvien sivudimension olisi hyvä olla korkeintaan noin 3200 pikseliä. Tästä johtuen käytettyjen valokuvien sivudimensiot puolitettiin ja käytettyjen kuvien resoluutio oli 3674 x 2452 pikseliä.

VisualSFM-projekti talletetaan kuvien ja harvan pistepilven laskemisen jälkeen. Tämän jälkeen talletettu projekti voidaan avata SURE -ohjelmassa, jossa kohteen pisteistöä voidaan täydentää. SURE-ohjelmassa VisualSFM:llä saatuja pistetietoja tihennetään. Tämän jälkeen tuloksena on useita erillisiä pistepilviä, jotka edustavat eri mahdollisuuksia kohteen kolmiulotteiseksi kuvaukseksi. Ohjelmassa on mahdollista tehdä saaduille pistepilville suodatus, jossa pilvet yhdistetään ja siistitään yhdeksi tiedostoksi. Tässä tapauksessa tulokseksi saadaan harvennettu pistepilvi, joka ei sisällä sellaisia pisteitä, jotka todennäköisimmin ovat virheellisiä.

Saadut pistetiedostot voidaan avata CloudCompare-ohjelmalla tulosten visuaalista tarkastelua varten. CloudCompare-ohjelmalla sulautettiin SURE:lla saadut suodattamattomat pistetiedostot yhdeksi pilveksi, jota myöhemmin eri tuloksia vertailtaessa olisi mahdollista avata rinnakkain muilla menetelmillä tuotettujen tulosten kanssa. Lisäksi saatu pistepilvi tallennettiin sellaiseen tiedostomuotoon, jonka käsittely on mahdollista Geomagic Qualify -ohjelmalla, koska kyseinen ohjelma ei tunnista



SURE:n omassa tallennusmuodossa olevia tiedostoja. Myös suodatettu pilvi tallennettiin muotoon jossa se voitiin siirtää Geomagic Qualifyyn jatkotarkasteltavaksi. Kuvaus- ja mittaustuloksia esitellään tarkemmin luvussa 4.3.

### 4.3 Pistepilvet ja visualisointi

#### 4.3.1 Laserkeilaus

Laserkeilauksen tuloksena oli kolmiulotteinen noin 800 miljoonan pisteen pistepilvi. Yleisellä tasolla pistepilven kohteen kattavuus oli tarkasteltaessa kohtuullisen hyvä ja pisteistöstä pystyi selvästi erottamaan kohteen sisältämiä yksityiskohtia. Kaikkiaan tilassa laserkeilaus suoritettiin kahdestakymmenestä kahdeksasta erillisestä keilainsijainnista ja nämä aineistot käsiteltiin ja yhdistettiin yhdeksi pistetiedostoksi luvussa 4.2.1 esitetyllä tavalla.



Kuva 4.6 Yksittäisen keilauskerran tasokuva.

Kustakin keilauskerrasta saatiin pistetiedosto, jota voitiin tarkastella kaksiulotteisena tasokuvana (Kuva 4.6) tai kolmiulotteisena näkymänä (Kuva 4.7).



Kuva 4.7 Kolmiulotteinen näkymä tilasta ennen ihmishahmojen poistoa pistemateriaalista.



Kuva 4.8 Kolmiulotteinen näkymä tilasta ihmisten poistamisen jälkeen.

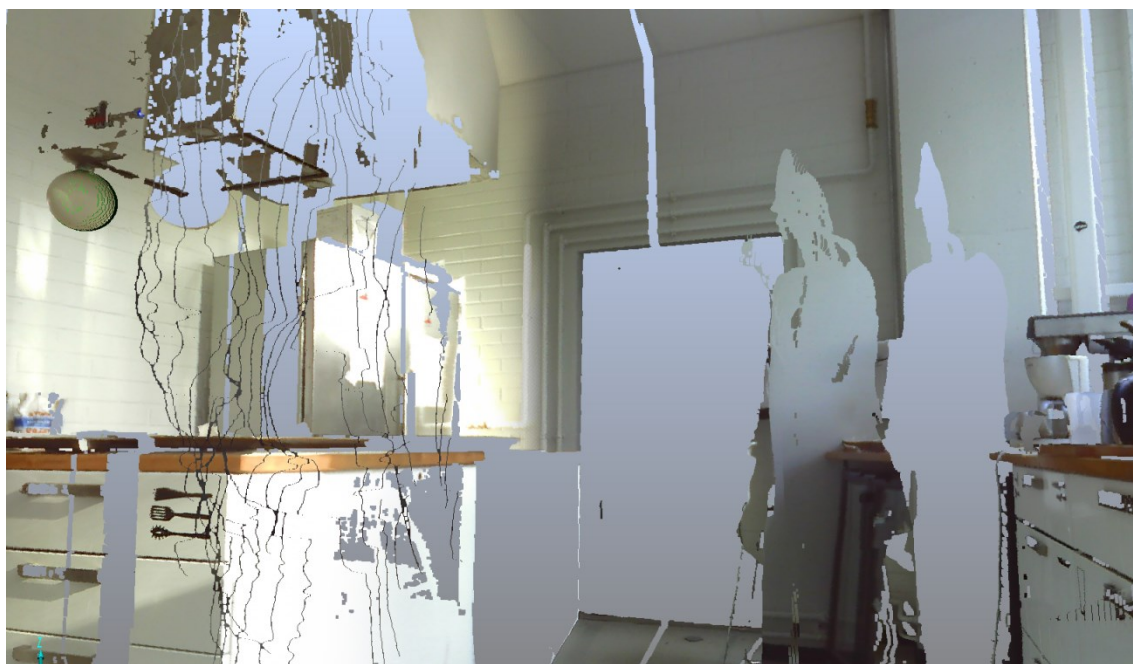
Laserkeilaus on työmenetelmänä hyvä ja nopea tapa kerätä ympäristöstä kolmiulotteista tietoa. Vaikka materiaalin jatkokäsittely voi olla suoraviivaista ja kohtuullisen helposti ymmärrettävää ja toteutettavissa Faro SCENEn mukana tulevan käyttäjäohjeen pohjalta, vaatii aineiston käsittelyyn tottuminen harjoittelua. Työmenetelmään ja aineiston käsittelyyn liittyy myös erilaisia ongelmia ja kysymyksiä joita käsiteltiin osittain jo aikaisemmissa luvuissa 4.1.2 ja 4.2.1

Kuten aineistosta saaduista kuvista (Kuva 4.7 ja Kuva 4.8) voi nähdä, muuttuva ympäristö luo haasteita laserkeilausta työmenetelmänä käytettäessä. Valitussa kohteessa suurin haaste muutosten suhteen olivat tilaa käyttävät ihmiset ja ihmisten liikkumisen aiheuttamat muutokset tilassa eri keilauskertojen välillä. Ihmisten aiheuttamia häiriöitä oli eroteltavissa useamman tyyppisiä. Yksi helpoimmin poistettavista muutoksista oli ihmisen saapuminen keilattavaan tilaan eri keilauskertojen välillä siten, että ihminen taltioitui keilauksen pistepilveen staattisena elementtinä. Tällaiset sijainniltaan liikkumattomat pistejoukot oli kohtuullisen helppo poistaa lopullisesta pistepilvestä. Toinen haastavampi häiriö oli keilauksen aikana keilattavan alueen läpi kulkevat ihmiset. Tällaiset tilanteet jättivät pisteaineistoon haamumaisia ihmishahmoja, sekä pisteistön väritykseen virheellisiä väriarvoja muuten sijainnillisesti oikein oleville kohteille. Samankaltaisia kohteen värilliseen esitykseen liittyviä virheitä ja hajanaisuutta jatkuvilla pinnoilla ja yksittäisissä objekteissa aiheutti myös kohteen sisäisen valaistuksen



paikalliset eroavaisuudet. Kolmas mahdollinen häiriön lähde oli ihmisten liikuttamat kalusteet ja muut tilassa sijaitsevat liikuteltavat objektit.

Osa ihmisten aiheuttamista haamujäljistä oli hankala tai jopa mahdoton poistaa kokonaan, koska useissa tapauksissa henkilö ei ole pysynyt paikallaan yksittäisen keilauksen aikana, vaan on kulkenut nopeasti keilattavan tilan läpi. Mikäli henkilö on pysynyt paikallaan yhden skannauksen ajan, mutta siirtynyt tai poistunut paikalta erillisten skannausten välillä, on ihmistä edustavia pisteitä mahdollista poistaa yksittäisen skannauksen pistepilvestä ja näin vähentää skannattavassa tilassa tapahtuvien muutosten vaikutusta yhdistetyssä pistepilvessä. Näissä tapauksissa kuitenkin menetettiin usein myös muuta pistetietoa ja heikennettiin yhdistetyn pistepilven kattavuutta ja tarkkuutta. Selkeä esimerkki keilaimen ohitse nopeasti kulkevan ihmisen vaikutuksesta näkyy muuten elementeiltään selkeän keittiön pisteaineistossa (Kuva 4.9). Keittiön tilan linjojen selkeyden ansiosta voidaan myös nähdä helposti liikkuvan kohteen vaikutus tasokuvaan (Kuva 4.10), kun häiriö on selkeästi tilan muista elementeistä poikkeava. Tilan läpi keilauksen aikana kulkeva henkilö voi vääristää tilan omia kiinteitä piirteitä. Tämän kaltaisissa tilanteissa henkilön aiheuttama häiriö on mahdollista poistaa materiaalista aineiston kokonaistarkkuuden kärsimättä, mikäli tilasta on tehty useampia keilauksia siten, että alue josta häiriötä edustava pistejoukko poistetaan, on katettuna myös vähintään yhdessä muussa tilan keilauspisteistöissä.



Kuva 4.9 Nopeasti ohi kulkevan ihmisen vaikutus pistepilveen.



Kuva 4.10 Keilauksen aikana ohikulkevan ihmisen vaikutus tasokuvaan.

Keittiön kuvissa (Kuva 4.9 ja Kuva 4.10) olleen kaltaisissa tilanteissa ihmisen läsnäolon vaikutusta pisteaineistoon oli käytännössä mahdotonta poistaa kokonaan menettämättä pistetietoja kohteesta. Syy tähän oli se, ettei alueen kattavia keilauksia ollut riittävän useasta sijainnista, jotta materiaali olisi kattanut häiriön kärsineen kuvien esittämän alueen. Koska täydentävä datankeruu ei muuttuvan ympäristön vuoksi ollut valitussa kohteessa tarkoituksenmukaista, jouduttiin käsiteltäessä ja analysoitaessa tyytymään kuvissa esiteltyyn materiaaliin.

Liikkuvien ihmisten lisäksi tilassa itsessään oli kiinteitä ja irtaimia elementtejä, jotka toivat työhön haastetta. Keilaustyön suunnitteluun ja toteutukseen vaikutti tilan jaettu rakenne ja tilassa sijaitseva suuri määrä irtaimistoa. Nämä kaksi tekijää kasvattivat selkeästi tarvittavien keilauskertojen määrää tilan kattavuuden takaamiseksi. Kuten kuvista (Kuva 4.11 ja Kuva 4.12) selviää, suuresta irtaintiheydestä johtuen eivät tässä työssä suoritettavat keilaukset olleet riittäviä näkyvyyden kattamiseksi kaikkialle kohteessa. Myös kohteen kiinteät elementit kuten seinien viertä kulkevat putkistot aiheuttivat tilaan alueita, joissa ei saatu pintoja täydellisesti kattavia pistetietoja. Koska tilassa oli hyvin runsaasti irtaimistoa, ei sen täydellinen poistaminen lopullisesta pistepilvestä ollut



mahdollista, koska tässä yhteydessä olisi jouduttu poistamaan pisteistöä siten, että osasta runsaasti kalustetusta alueesta olisi pistetiedot menetetty lähes täydellisesti.



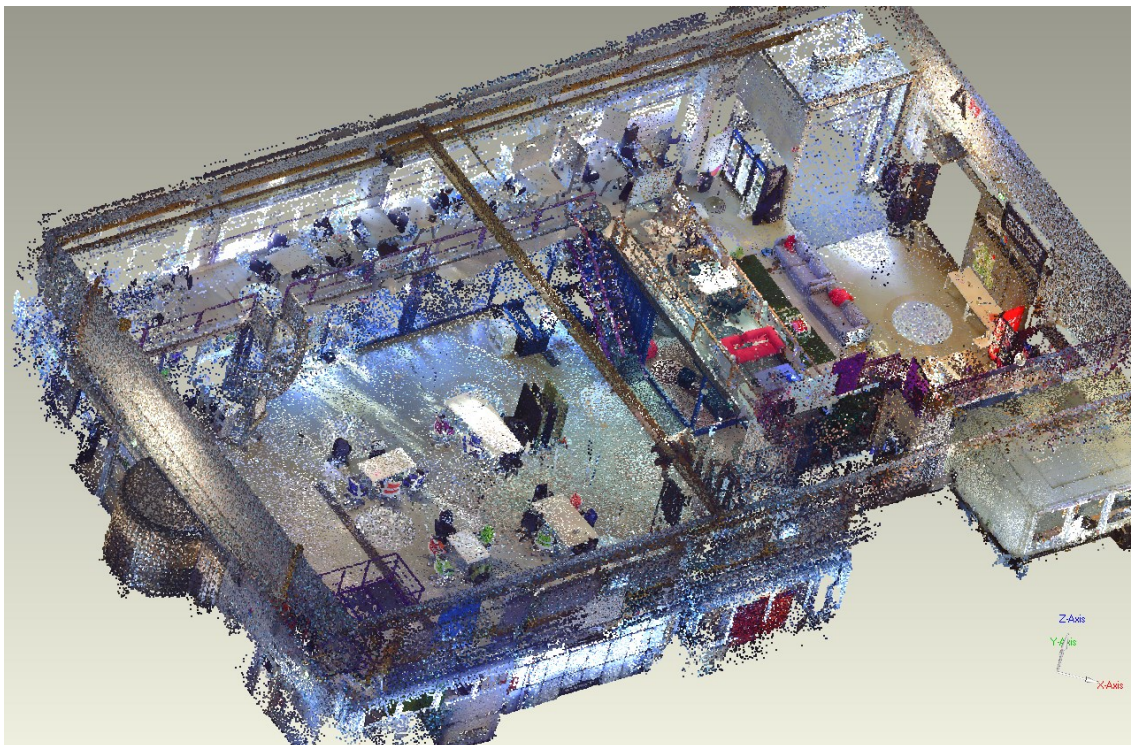
Kuva 4.11 Objektirikkaassa ympäristössä ilmeneviä katveongelmia.

Läpinäkyvien objektien luomat selkeästi erotettavat häiriöt olivat lähinnä läpikuultavilta pinnoilta puuttuvat pistetiedot. Kuten kolmiulotteisesta näkymästä otetusta kuvasta voi nähdä (Kuva 4.12) läpikuultava kohde tallentuu pistepilveen vain osittain. Muut mahdolliset läpikuultavien kohteiden aiheuttamat ongelmat kuten hajapisteet tai kuultavan pinnan takana olevien pisteiden sijainnin vääristyminen ovat hankalampia havaita kohteen kaltaisessa runsaasti kalustetussa ympäristössä.



Kuva 4.12 Näkymä osittain läpikuultavista parven kaiteen pinnoista.





Kuva 4.13 Laserkeilauksella tuotettu harvennettu jatkokäsitteltävä pistepilvi ilman kattorakenteiden pisteitä.

Kuten jo luvussa 4.2.1 kerrottiin, keilaamalla saatua pistepilveä harvennettiin jatkokäsittelyä varten. Yllä olevassa kuvassa (Kuva 4.13) nähtävillä on harvennettu koko tilaa edustava pistepilvi, josta on sisänäkyvyyden saavuttamiseksi poistettu tilan kattoa edustavat pisteet. Koska jatkotarkastelussa halutaan perehtyä kohteesta eri menetelmin saatujen mittaustulosten keskinäiseen vertailuun lähinnä tilan ulkoisiin mittoihin liittyen, katsottiin harvennetun pistepilven olevan vertailuun riittävä. Yksityiskohtien tarkkuus kuitenkin kärsii pisteistöä harvennettaessa. Pisteistön harvennuksen vaikutuksia yksityiskohtien erottuvuuteen voi tarkastella liitteen 2 kuvasarjasta.

#### 4.3.2 Matterport

Ensimmäisen kerran Matterport kuvausmateriaalista muodostettua kolmiulotteista mallia kohteesta voi tarkastella internetselaimen kautta Matterportin portaalipalvelussa mallien katseluun suunnitellulla katseluohjelmalla. Selaimen kautta esitettävää mallia voi tarkastella useasta eri näkökulmasta, joista yhdessä mallia voi tarkastella sisältäpäin, jolloin syntyy vaikutelma tilassa kävelystä (Kuva 4.14).

Sisältäpäin tarkastellessa mallinnuksen lopputulos näyttää yleisellä tasolla kauniilta ja kohdetta vastaavalta. Yksi syy tähän on kameran sijainteihin sidotut katselupaikat. Käytännössä mallin sisällä voi seistä ainoastaan kohdissa, joihin kamera sijoitettiin

kuvausten aikana. Tästä seuraa, että tarkasteltavat näkymät ovat puhtaan näköisiä ja aukottomia. Tarkastelupisteeltä toiselle siirryttäessä kuitenkin voi havaita mallin rikkoutumista sellaisten yksityiskohtien kohdalla, jotka eivät ole olleet staattisia kuvausten aikana. Esimerkiksi ihmisten asento tai läsnäolo kuvassa voi muuttua. Yhtenä tilaan liittyvänä visuaalisena häiriönä mallissa voitiin havaita parvelle siirtyessä parven kaiteen läpi kulkeminen. Tämä johtui siitä, että havaintopaikalta toiselle siirrytään suoraa näköyhteyttä pitkin, joten kun parvella on kuvattu kamera niin korkealla, että sen näkemäalue on havainnut kaiteen yli, siirtymälinja seuraa tätä näkölinjaa.



Kuva 4.14 Näkymä Matterport-mallin sisältä. Näkymä on tallennettu Matterport-portaalin katseluohjelmasta.

Selaimessa mallia voi katsella myös suoraan ylhäältä päin jolloin nähdään kuvatun tilan pohjapiirros. Kuten nähtävillä on (Kuva 4.15), tästä näkymästä käy ilmi kuvauksessa muodostuneet katvealueet, joille kameralla ei ollut näköyhteyttä. Kuten kuvasta nähdään, katvealueita syntyy helposti paikkoihin, joissa on runsaasti irtainta tavaraa ja kameraa ei saada kierrätettyä erilaisten tavarakeskittymien ympäri. Yhtenä esimerkkinä on kuvan (Kuva 4.15) ylälaidassa tilan alkoveja esittävä aineisto, joissa alkoveissa sijaitsevien huonekalujen ja ulkoseinän väliin jää runsaasti katveista aluetta. Katvealueet olisi voitu välttää viemällä kuhunkin alkoviin yksi kuvauspiste lisää, mutta alkovien tilan ollessa käytössä kuvausten aikana, niihin sijoitettuja kuvauspisteitä ei sisällytetty alkuperäiseen kuvaussuunnitelmaan. Mikäli kuvatussa tilassa on useita kerroksia, voi kutakin kerrosta tarkastella omana pohjapiirrosnäkymänään.





Kuva 4.15 Mallin pohjapiirros tilan maanpinnan tason kerroksesta. Sisääntulo- ja keittiötilat oikeassa laidassa kuvaa.

Kolmas tarkastelunäkymä on niin kutsuttu nukkekotinäkymä, jossa kuvattua tilaa voi tarkastella kolmiulotteisena objektina vapaavalintaisesta katselukulmasta (Kuva 4.16). Myös tässä katselumahdollisuudessa näkyy selkeästi, mikäli kuvattuun aineistoon on muodostunut katvealueita.

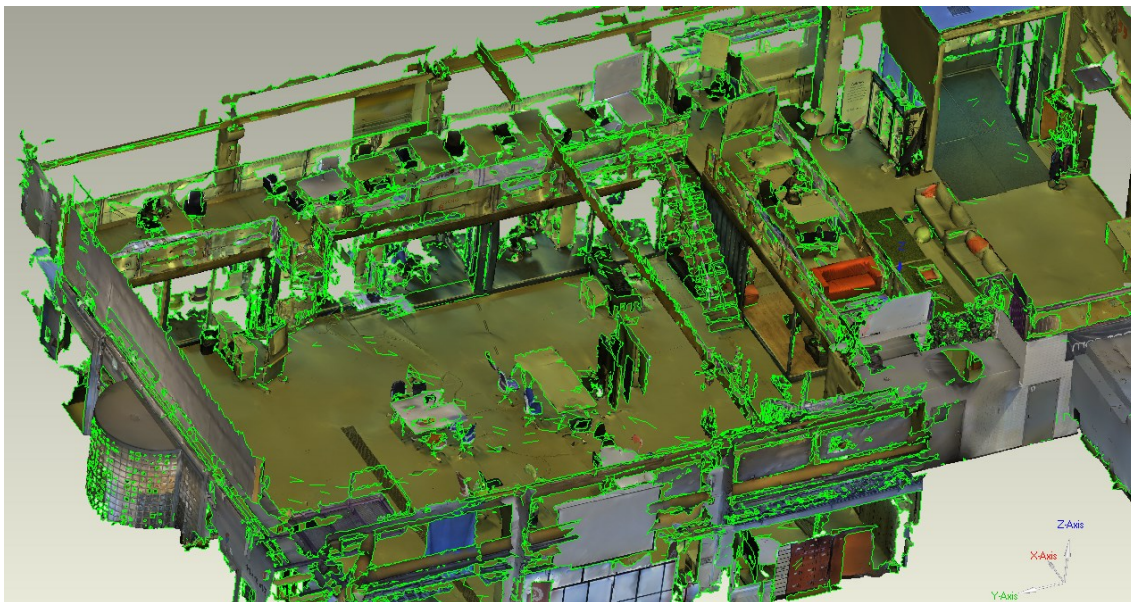


Kuva 4.16 Nukkekotinäkymä lähempää osatilasta. Tilan sisääntulotila ja tilan jakavan kontin ulkoseinä.

Internetselaimessa toimivassa katseluohjelmassa tilan katon elementeistä nähtävillä olivat vain ne, jotka selkeästi poikkesivat katon tasosta. Näin ollen katon mallinnettua rakennetta ei pystynyt tarkastelemaan hyvin. Tätä varten malli oli ladattava Matterportin portaali palvelusta ja avattava jollain kolmiulotteisten mallien käsittelyohjelmalla, joka on kykenevä käsittelemään mallin tallennusmuotoista dataa.

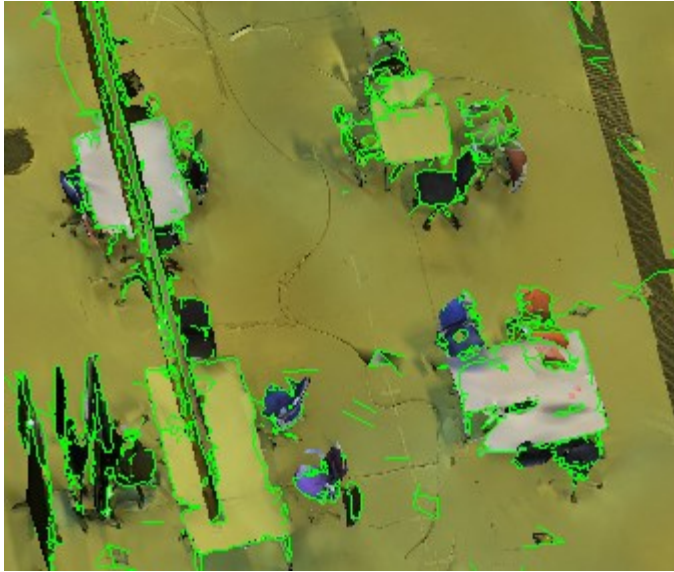


Matterport-portaalista ladattu malli avattiin tarkasteltavaksi Geomagic Qualify -ohjelmaan ja näin mallia oli mahdollista tarkastella tilan mallia kokonaisuutena eikä ainoastaan kerros kerrallaan kuten Matterportin portaalin esityksessä. Mallia tarkastellessa (Kuva 4.17) nähdään selkeästi tilassa alueita, jotka ovat jääneet katveisiksi tilaa kuvattaessa, tai ovat yksityiskohdiltaan tai ominaisuuksiltaan olleet sellaisia, että niiden mallintaminen kuvatun materiaalin pohjalta ole ollut mahdollista.



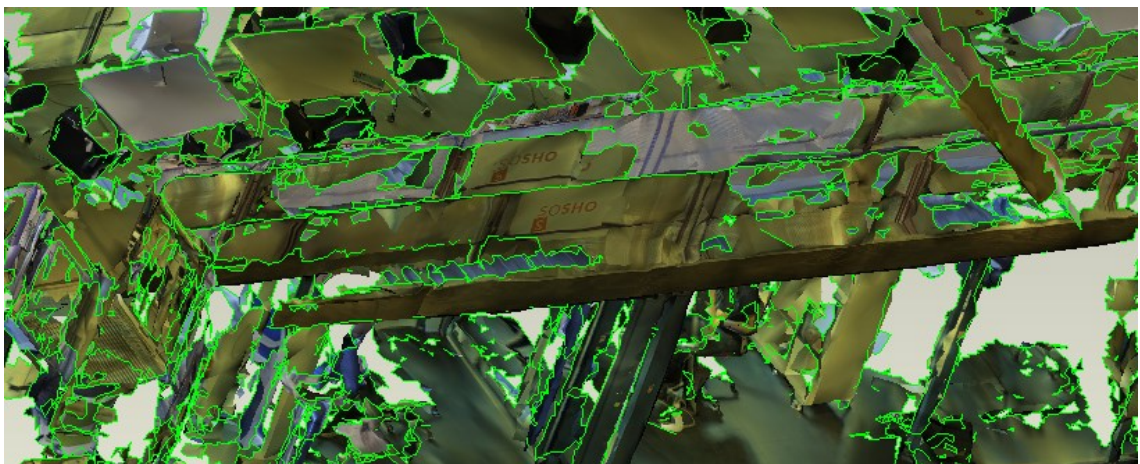
Kuva 4.17 Matterport-malli Geomagic Qualify -ohjelmaan avattuna.

Geomagic Qualifyssä mallin yksityiskohtia oli mahdollista tarkastella lähemmin kuin Matterportin portaalissa ja yksityiskohdista paljastuikin erilaisia puutteita tai virheitä. Etenkin hallin perällä, jossa avointa tilaa oli enemmän ja kuvattava alue laajempi, pystyttiin havaitsemaan yksityiskohtien vääristymisiä. Esimerkkinä tästä on hallissa sijainnut pöytäryhmä (Kuva 4.18) jossa sijaitsevat pöydät olivat kaikki muodoltaan suorakulmaisia ja väriltään keskenään samanlaisia. Kuten kuvasta voi nähdä, sekä pöytien värit että muodot ovat vääristyneet mallinnusprosessin aikana. On mahdollista, että osa vääristymistä olisi voitu eliminoida, mikäli aluetta olisi kuvattu käytettyä kamerasijaintitiheyttä lisäämällä. Suoritetuissa kuvauksissa pöytäryhmää (Kuva 4.18) pyrittiin kuvaamaan sen ympäriltä, sekä ryhmän keskeltä useista kamerasijainneista. Tämän kaltaisia yksityiskohtien vääristymiä ilmeni mallissa huomattavan paljon etenkin hallin pinta-alaltaan suuremman osan ja parven osalta.



Kuva 4.18 Yksityiskohtia Matterport-mallista Geomagic Qualifyssä.

Yksi selkeimmistä vääristymistä, joka havaittiin vasta malliin Geomagic Qualifyssä tehdyssä tarkastelussa, oli parven kaiteen elementtien tuplaantuminen (Kuva 4.19). Virhettä ei havaittu alun perin Matterportin portaalissa mallia tarkasteltaessa, koska portaalissa malli esitetään yksittäisinä kerroksina, joiden välillä näkymää kohteesta vaihdellaan. Uusintatarkastelussa osoittautuikin, että mallissa, jota portaalissa esitetään, kaide on mallinnettu sekä hallin varsinaiseen maantason kerrokseen että parven kerrokseen. Näiden kahden eri kerrokseen mallinnettujen kaiteiden muuhun tilaan suhteutetut sijainnit poikkeavat toisistaan, vaikka kyse on samasta parven kaiteesta. Selkeimmin kaiteen tuplaesityksen mallissa voi havaita kaiteeseen kiinnitetystä Sosho-kyltistä (Kuva 4.19). Varmuutta ei ole siitä, johtuuko kyseinen virhe Matterportin palvelun tekemästä mallinnuksen aikaisesta virheestä vai siitä, että Matterport-teknologia ei sovellu kohteen kaltaisen suuren, avoimen ja useaan tasoon jaetun tilan kuvaamiseen ja mallintamiseen luotettavasti.



Kuva 4.19 Parven virheellinen tuplakaide Matterport-mallissa.



### 4.3.3 Valokuvat

123D Catch ei sovellu ainakaan tämän työn kaltaisen sisätilan mallintamiseen. Kuten kuvista näkee (Kuva 4.20 ja Kuva 4.21), molemmissa tapauksissa tuloksissa on paljon vääristymiä ja elementtien yhteensulautumisia. Vertailussa olevan pienempi-resoluutioisten kuvien sivudimensiot olivat neljäsosa alkuperäisestä kuvien dimensioista. Näin ollen kuvien resoluutio on yksi kahdeksasosa alkuperäisestä. Kuvien perusteella nähdään, että aikaan saaduissa malleissa on eroja tarkkuudessa niiltä osin mistä ohjelma on kyennyt elementtejä havaitsemaan. Tarkempiresoluutioisissa kuvissa esimerkiksi suorat linjat säilyvät suorina paremmin ja yksityiskohdat ovat visuaalisesti selkeämpiä. Tämä voidaan havaita Startup Sauna -banderollista ja sen alapuolella sijaitsevista laudeistuimista.



Kuva 4.20 123D Catch - malli ottoresoluutioisista kuvista.

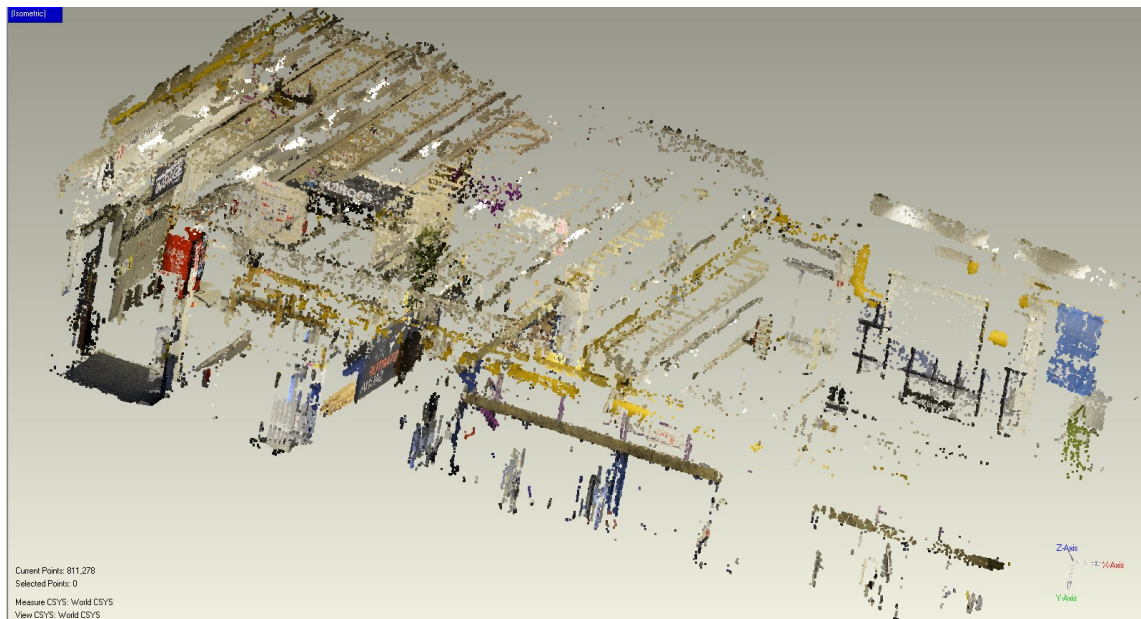


Kuva 4.21 123D Catch - malli, pieniresoluutioiset kuvat.

Kuvista voidaan nähdä, ettei kyseinen ohjelma kykene havaitsemaan isossa tilassa pieniä objekteja. Vihreiden mattojen päällä tulisi olla kaksi korkeajalkaista pöytää, mutta näistä malliin on tallentunut vain ristinmuotoiset pöydänjalat. Yksityiskohtien tarkkuuden lisäksi eroja näkyy myös lattian havainnoinnissa. Tämä johtuu mahdollisesti käytetyn

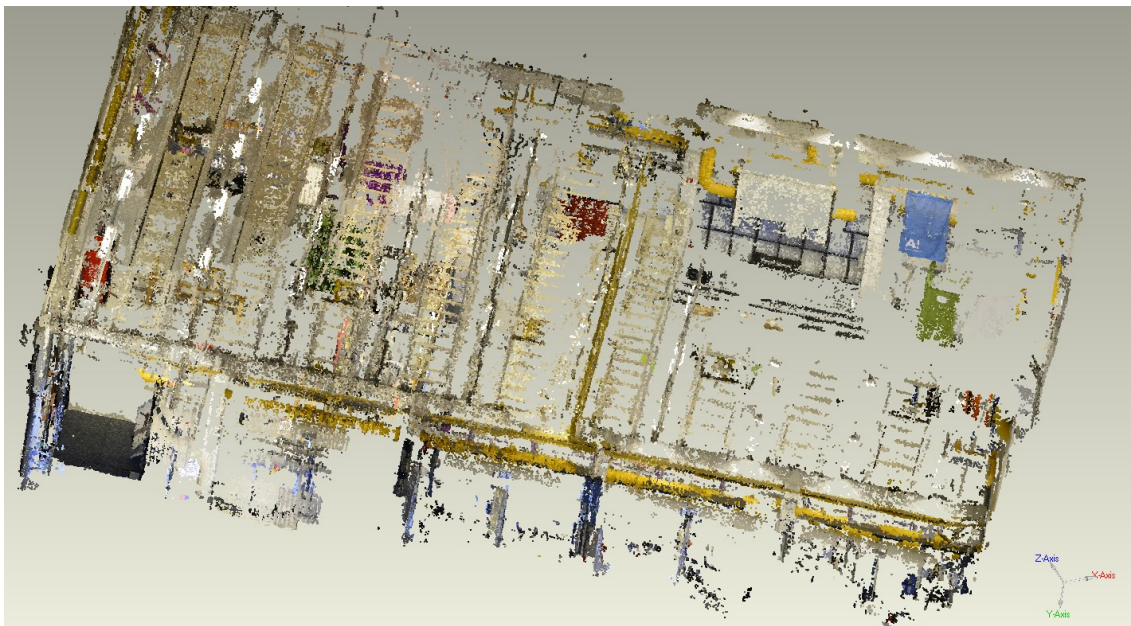
kuvaryhmän kuvien keskinäisten valaisuolosuhteiden eroista. Kamerassa käytössä oleva valotusaika ei ollut kiinteäksi säädetty, vaan määräytyi automaattisesti, kun käytetty aukkokoko oli säädetty samana pysyväksi koko kuvauksen ajaksi.

VisualSFM ja SURE -ohjelmia käytettäessä saatu lopputulos vaikutti lupaavammalta. VisualSFM:llä alustettu ja SURE:lla viimeisteltynä lopputulos oli joukko potentiaalisia kohdetta esittäviä pistepilviä. Tämän lisäksi saatavilla oli tästä joukkotuloksesta suodatettu yksittäinen pistepilvi.



**Kuva 4.22 VisualSFM:n ja SURE:n tuottama suodatettu pistepilvi.**

Kuten kuvista (Kuva 4.22 ja Kuva 4.23) voi nähdä sisältävät suodattamattomat pistepilvet yhdessä enemmän tietoa kohteesta kuin suodatettu. Suodattamattomassa pistepilvessä on noin 800 tuhatta kohdetta edustavaa pistettä ja vaihtoehtoisista pilvistä koottu tapaus sisältää noin 20 miljoonaa pistettä. Molemmissa kuvissa oikeassa laidassa on sininen banderolli, josta nähdään viitteellisesti eri pistejoukkojen yksityiskohtien erottuvuuksien eroja aineistojen välillä.



Kuva 4.23 VisualSFM ja SUREn tuottamat pistepilvet suodattamattomina.

Usean pistepilven yhdistetystä tuloksesta (Kuva 4.23) näkee, kuinka tilan eri osista tehdyissä pistehavaintotiheydessä on eroavaisuuksia tilan sisällä. Kuvan oikeassa laidassa tilasta ja sen yksityiskohdista on selkeästi kyetty havaitsemaan selkeästi heikommin pisteitä kuin vasemmalla puolen. Tämä on todennäköisesti seurausta tilan rakenteesta. Kuvassa vasemmalla laidalla oleva kohteen osa on ulottuvuudellisesti suppeampi kuin kuvan oikeassa laidassa oleva osa. Näin tilan kuvassa vasemmalla olevien eteisen ja keittiön päätyä edustavien kuvien on tarvinnut kattaa lyhempiä etäisyyksiä yksittäisessä kuvassa ja kohteen yksityiskohdat ja yksilöivät piirteet ovat todennäköisesti olleet selkeämpiä tilan tätä osaa edustavissa kuvissa.

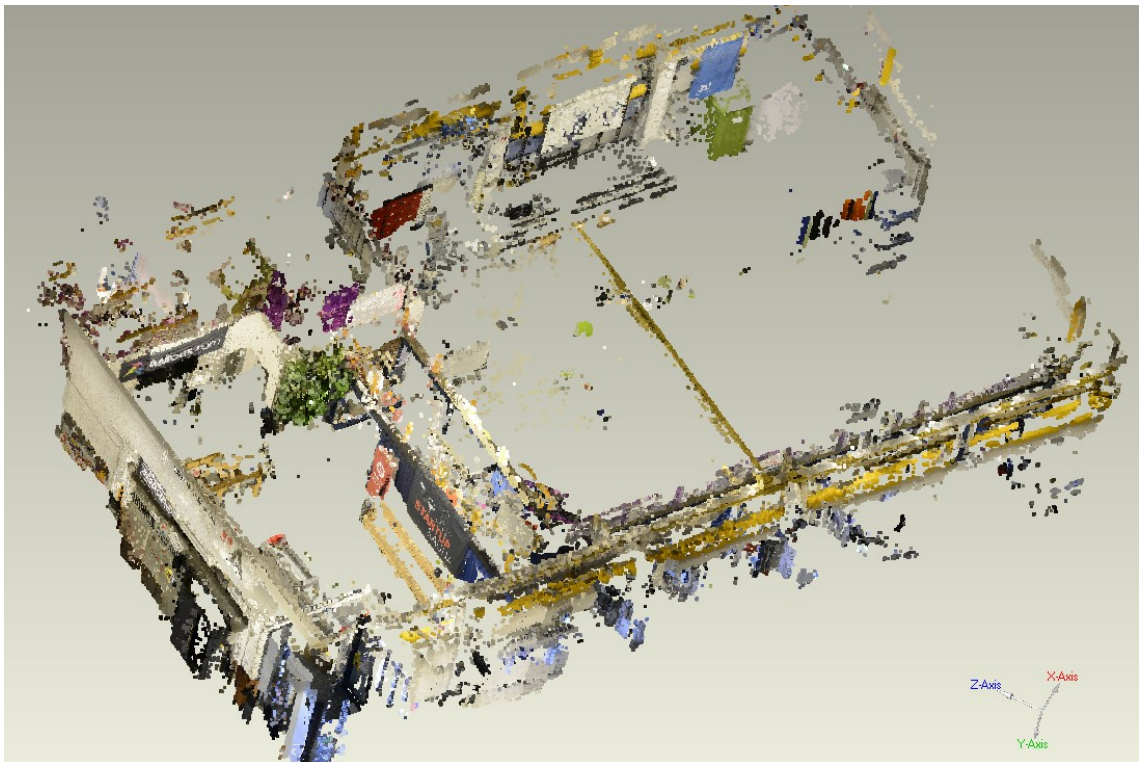
Kuvan (Kuva 4.23) vasemmassa reunassa oleva alue on jaettu kahteen osaan (oleskelutila ja keittiö) ja tämän lisäksi tilan jakavan kontin päälle on rakennettu parvi, jolta kuvattiin. Näin saatiin katettua tilan kuvassa vasemman puoleinen laita kahdelta eri korkeudelta kuvattuna. Tilan oikealla puoliskolla sijaitsi vain yksi suuri tilan osa, joka pyrittiin kuvaamaan sen reunoja kiertäen ja kuvaamalla aina huoneen keskustaa ja vastakkaista reunaa kohden. Tilassa sijaitseva parvi kattaa myös osan kuvan alalaidan puoleisesta seinästä ja tämän vaikutus näkyy myös tilan katon havainnoinnissa, kun verrataan kuvan oikeassa ylänurkassa ja oikeassa alanurkassa olevien pisteistöjen tiheyttä.

Molemmista kuvista (Kuva 4.22 ja Kuva 4.23) voidaan myös nähdä, kuinka heikosti käytetyt ohjelmat (VisualSFM ja SURE) havaitsivat tilan lattiaa ja osan muista lattian suuntaisista tasoista. Lattian puutteellinen havaitseminen johtuu lattiapinnan



homogeenisyydestä, jolloin ei ole ollut mahdollista löytää pinnasta yksilöiviä piirteitä, joiden avulla sen sijainti olisi voitu määrittää. Ongelma aiheutuu VisualSFM -ohjelman käyttämästä SIFT -algoritmista (scale-invariant feature transform). Koska kyseessä on usein ilmenevä ongelma kohteentunnistuksen yhteydessä, on aiheen yhteydessä syntynyt myös ehdotuksia ongelman ratkaisemiseksi. (Lehtola & Ronnholm 2014, Wu)

Myös valtaosa tilan pienemmistä objekteista (huonekaluja) on jäänyt pois pistetiedoista. Tämä ilmiö näkyy varsinkin hallin pinta-alallisessa suuremmassa päässä, jossa yksittäisten kuvien kattamat etäisyydet olivat suurempia ja kuvissa esiintyvät yksityiskohdat etäisyyden kasvaessa pienempiä. Tilan sisäisiä yksityiskohtia voi tarkastella paremmin kuvasta (Kuva 4.24), jossa pistepilvestä on poistettu kattoa edustavat pisteet ja näin voidaan nähdä tilaan sisälle.



Kuva 4.24 Valokuvista tuotettujen filteröimättömien pistepilvien joukko, josta on poistettu kattoa edustavat pisteet.

Laserkeilauksen ja Matterport-kuvauksen tulosten kanssa vertailtavaksi valittiin suodattamaton pistepilvijoukko.

#### 4.3.4 Eri menetelmien tuottamien tilatietojen keskinäinen vertailu

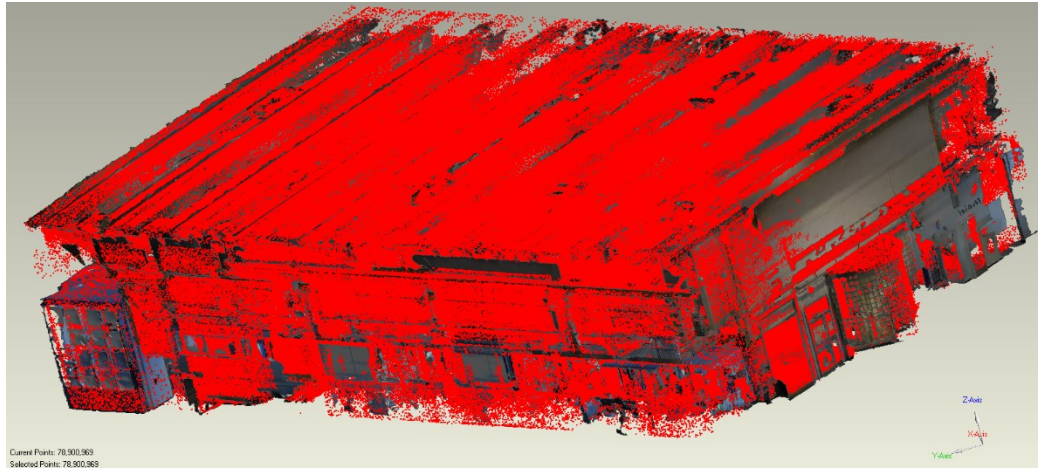
Eri menetelmin tuotettuja tuloksia pyrittiin ensimmäisenä tarkastelemaan CloudCompare -ohjelmaa käyttäen, mutta kohdetilan suuren koon vuoksi etenkin laserkeilauksella

tuotettu pisteaineisto oli ohjelmalle raskasta käsitellä. Tämän vuoksi tulosten vertailu suoritettiin ainoastaan Geomagic Qualifyä käyttäen. Eri menetelmin tuotetut pistepilvet ja Matterport-materiaalin tapauksessa valmis malli kohteesta tuotiin yhteen Geomagic Qualify -ohjelmaan keskinäistä vertailua varten. Ensimmäiseksi tarkasteltiin kunkin pilven tai objektin karkeita ulkomittoja, jolloin voitiin ratkaista, otetaanko kaikki mallit mukaan keskinäiseen tarkasteluun. Referenssiaineistoksi valittiin laserkeilaimella tuotettu pistepilvi. Koska pisteet, joiden välisiä etäisyyttä malleista mitattiin, valittiin manuaalisesti, mitattiin tilan etäisyyksiä kustakin mallista useammasta kohtaa. Laserkeilauspistepilvestä mitattuna tilan korkeudeksi saatiin 7 metriä, leveydeksi 19 metriä ja pituudeksi 30 metriä. Tilan koko mitattiin laserkeilauksen pistepilvestä, koska laserkeilauksessa kohteen mittakaava määrittyy jokaisella etäisyyshavainnolla. Vaikka syvyyskameron mittakaava määrittyy vastaavasti syvyyshavainnoista, mitattavien etäisyyksien lyhyiden vuoksi ison tilan mittakaavaa ei voi määrittää yhtä tarkasti kuin laserkeilauksella. Työssä käytetyllä valokuvien mittausmenetelmällä ei suoraan saada kohteen todellista mittakaavaa, ainoastaan kohteen kolmiulotteinen muoto. Mikäli valokuvista halutaan mittakaavatieto, täytyy havaintoihin sisällyttää vähintään yksi mittajana eli mitattu pisteväli kohteesta. Tilan visualisoinnissa kohteen mittakaavatieto on kuitenkin toissijainen, mikäli aineistoon ei haluta sovittaa etukäteen määrätyn kokoisia esineitä tai elementtejä.

Tarkemmin päätettiin vertailla keskenään Matterport-kuvausten ja laserkeilauksen tulosten eroja, sekä Matterport-mallin ja valokuvista tuotetun mallin keskinäisiä eroja. Laserkeilauksen ja valokuvauspohjaisen pistepilvien tarkkuuseroista on saatavilla tuoretta tietoa Lehtolan et al. (2014) tutkimuksessa automaattisesta kuvapohjaisesta mallinnuksesta. Kyseisessä tutkimuksessaan Lehtola et al. (2014) ovat tutkineet laserkeilauksen ja valokuvapohjaisen mallinnuksen eroja sisätiloja mallintaessa, ja valokuvapohjaisen mallinnuksen tuottamasta pistepilven pisteistä noin 70 % sijoittui alle viiden senttimetrin virhemarginaalin sisään. Tutkimuksessa käytetty kuvausaineisto on kerätty sisätilassa, joka käsittää useita kooltaan ja muodoltaan erilaisia tilanosia, jotka ovat kooltaan olleet pienempiä kuin Startup Saunan kuvattu tila.

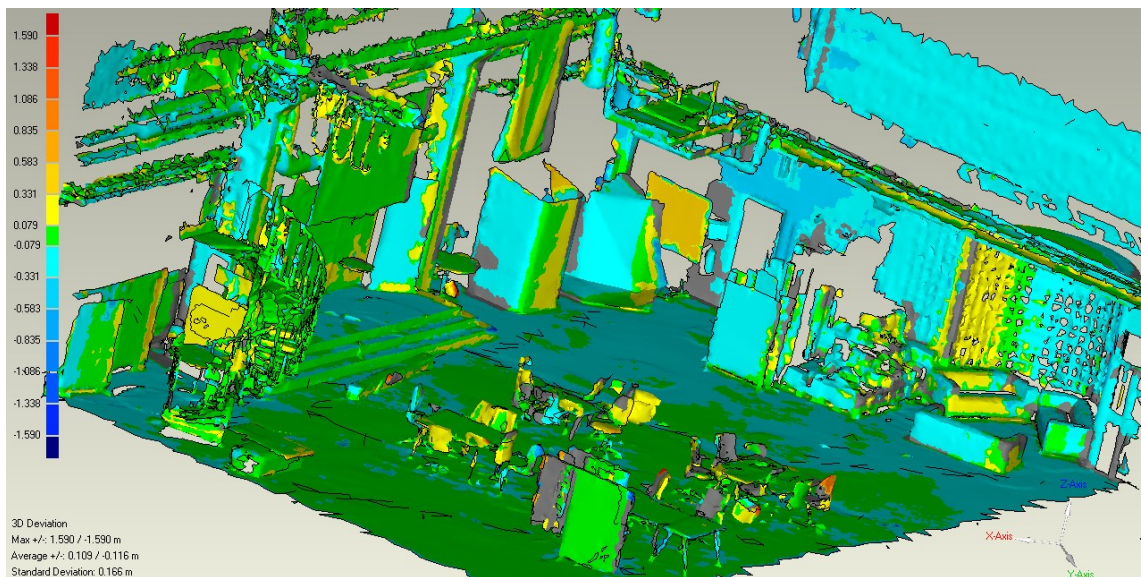
Matterport-mallille ja laserkeilauksen pistepilvelle suoritettiin vertailu, jossa tulosten keskinäisiä eroavaisuuksia tarkasteltiin lähemmin. Tämä suoritettiin Geomagic Qualifyä

käyttäen ja tarkastelun kohteena oli pistepilven ja Matterport-mallien keskinäinen elementtien etäisyys ja etäisyyden variointi eri osissa tilaa. Vertailua varten tulokset asetettiin käytetyssä ohjelmassa rinnakkain. Kuvassa laserkeilauksen pistepilveä edustaa punaiseksi väritetty pistetietoa ja Matterport-mallia kohteen värein väritetty malli (Kuva 4.25).



**Kuva 4.25** Laserkeilauksen pistepilvi ja Matterport-malli vertailua varten sijoitettuna.

Matterportin ja laserkeilauksen pistepilven vertailun referenssiaineistona oli tarkoitus käyttää laserkeilaamalla saatua pistepilveä, mutta käytetyn ohjelman rajoituksena kolmiulotteisten data-aineistojen vertailussa oli välttämättömyys valita vertailun referenssikohteeksi käsiteltävistä aineistoista valmiiksi malliksi muodostettu datajoukko. Näin vertailussa referenssinä toimi Matterport-malli ja vertailtava aineisto oli laserkeilaimella tai valokuvista tuotettu pistepilvi. Kuten jo aiemmin mainittiin, aineistojen vertailu rajoitti kohteen eri menetelmin tuotetun tilatiedon sijaintieroja.



**Kuva 4.26** Hallin avoimen takaosan mittausmenetelmien tulosten etäisyyspoikkeamia. Vertailussa ei ollut mukana hallin parvea tai konttia.



Geomagic Qualify esittää kahden eri mallin väliset etäisyyserot värikarttana kohdeaineistoista. Tehdyssä vertailussa aineistossa on nähtävillä aukkoja sekä harmaita alueita aineistossa (Kuva 4.26). Vertailukuvissa näkyvät aukot ilmenevät mallissa niissä kohdin, joissa ei ole saatavilla Matterport-mallissa dataa ja taustaa tummemman harmaat alueet puolestaan ovat laserkeilauksessa jääneitä katvealueita, joista ei ole tallennettua pistetietoja pilvessä. Mallien etäisyyseroavaisuuskuvien etäisyysmitat ovat metreissä mitattuja.

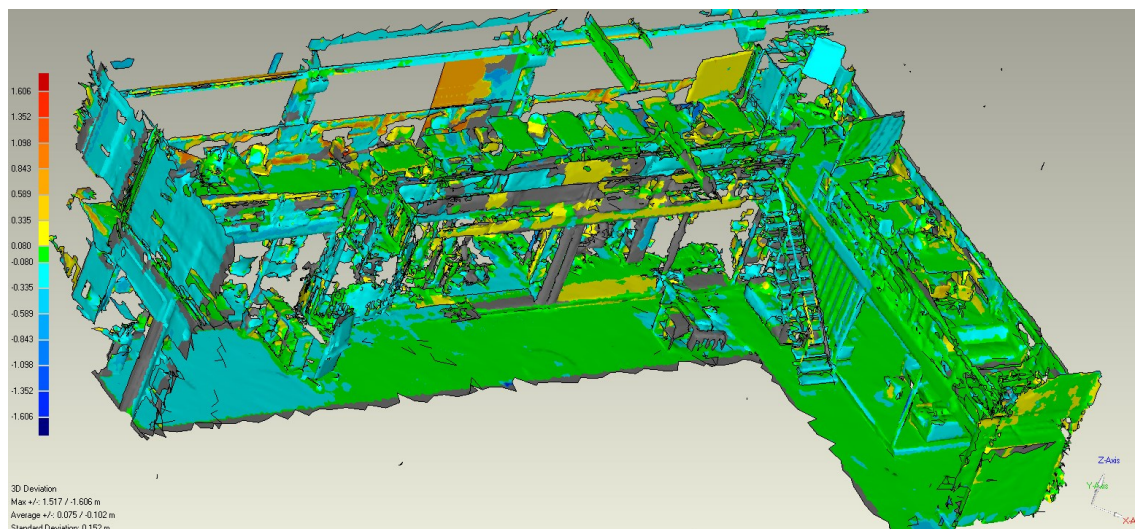
Vertailun tuloksena tilasta visuaalisen eroavaisuusesityksen lisäksi saatiin etäisyyspoikkeaminen suurimpia arvoja sekä keskiarvoja. Lisäksi tilan etäisyysvaihteluille laskettiin keskihajonta. Koska tila on jaettavissa ominaisuuksiltaan erilaisiin osiin, tehtiin koko tilan kattavan vertailun lisäksi myös osatilavertauksia. Vertailujen etäisyysvaihtelut ja keskihajonnat on koottu taulukkoon (Taulukko 3). Etäisyyserojen enimmäisarvoista sekä keskiarvoista saatiin sekä negatiivisia että positiivisia poikkeamia vertailussa. Etäisyyserojen keskiarvoissa laskettiin erikseen näin ollen negatiivisten etäisyyksien keskiarvo ja positiivisten etäisyyksien keskiarvo. Ainoastaan koko tilan vertailuaineisto piti sisällään hallin kattorakenteet. Näin ollen sisääntulotilan ja keittiön, parven ja kontin, sekä hallin avoimen osan vertailu ei sisällä kattorakenteiden eroavaisuuksia

**Taulukko 3 Eri menetelmien tulosten välisiä eroja, laserkeilaus ja syvyyskamera.**

	Etäisyyserojen keskiarvo	Keskihajonta
Koko tila (katto sisältyy verrattaviin tietoihin)	+ 0,068m - 0,078m	0,124m
Sisääntulotila ja keittiö	+ 0,058m - 0,065m	0,086m
Parvi ja kontti	+ 0,075m - 0,102m	0,152m
Hallin pinta-alaltaan suurimman osan lattia-alue ilman parvea ja konttia	+ 0,109m - 0,116m	0,166m
Hallin kattorakenteet	+ 0,093m - 0,076m	0,143m

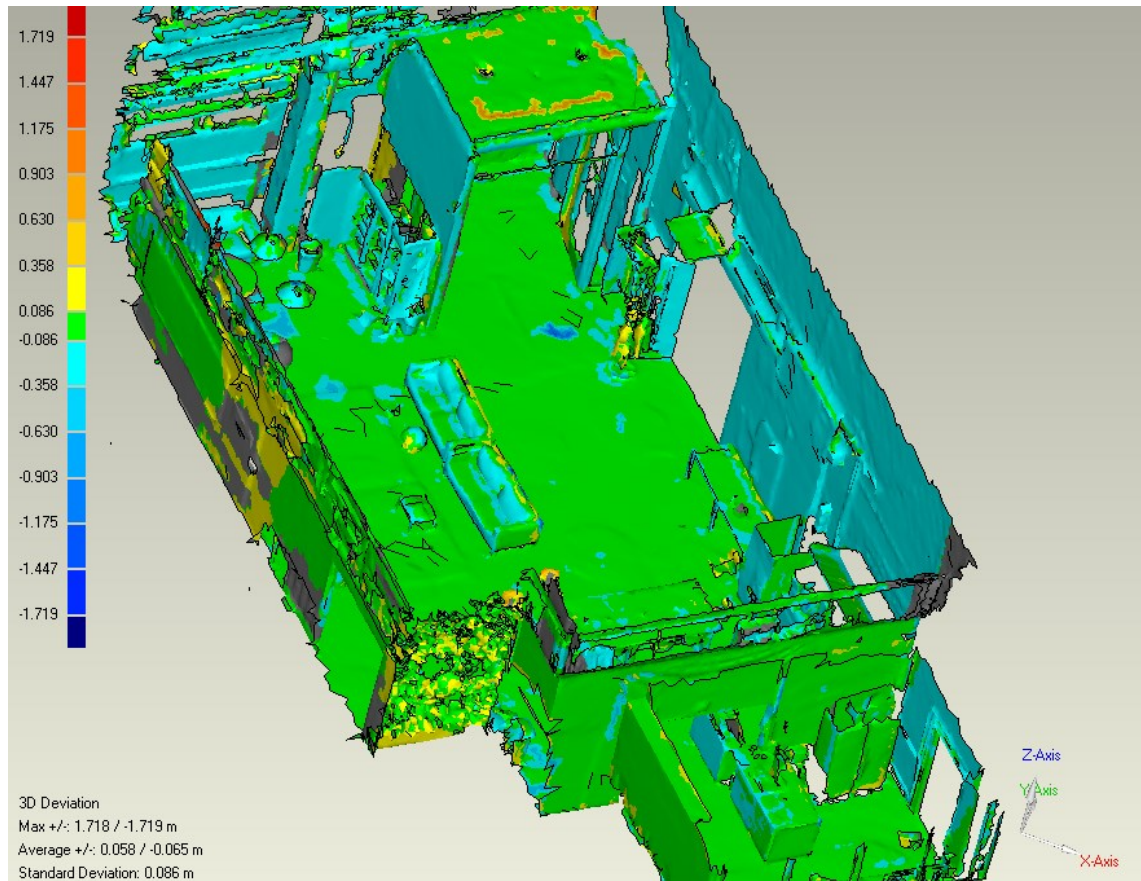
Jos laserkeilausaineiston ja Matterport-mallin yhtenevyyttä tarkastellaan ainoastaan taulukoidun (Taulukko 3) numerodatan pohjalta aineistojen väliset erot vaikuttavat suurilta. Vertailun värikarttatuloksia tarkastelemalla voidaan kuitenkin havaita, että suurimmat etäisyyserot aineistojen välillä sijoittuvat sellaisiin tilan alueisiin, joissa paikkatiedon kerääminen on ollut tilan olosuhteiden vuoksi haastavaa. Kuten osittaisesta

parven alueen eroavaisuuskuvasta (Kuva 4.27) nähdään, kyseisen alueen suurimmat etäisyyserot sijoittuvat alkoviin ja parven takaseinään jossa Matterport -mallissa sijaitsee käyttäjän mittausvaiheessa merkitsemiä elementtejä, joiden sijaintiin on tämän merkitsemisen vuoksi voinut syntyä poikkeavan suuri virhe.



Kuva 4.27 Parven, kontin ja alkoviin mallien etäisyyseroavaisuuksia.

Myös hallin pinta-alallisesti suurimmasta avonaisesta alueesta tehtiin osa-analyysi mittaustulosten eroavaisuudessa. Tuloksena saadusta värikartasta (Kuva 4.26) voidaan nähdä, että suurimmat etäisyyserot sijaitsivat alueilla joissa on paljon erilaisia irtokappaleita. Tulosten väliset erot vaikuttaisivat myös pääsääntöisesti kasvavan, kun siirrytään avoimemmassa osassa tilaa tilan peräosaan. Yhtenä mahdollisena syynä tähän on Matterport-mallin tarkkuuden heikkeneminen, jonka mahdollisena syynä on Matterport-kameran lyhyt kuvakanta, eli kuvanottoaikojen väli, jolloin kohteesta laskettavien etäisyyksien sisältämä virhe kasvaa. Tätä mahdollisuutta tukee myös kohteen sisääntulotilan ja keittiön alueen mittaustulosten eroavaisuuksien tarkastelu (Kuva 4.28). Lukuun ottamatta alueita, jotka selkeästi ovat olleet heikosti havaittavissa kuvauksien aikana, eri menetelmin saadut tulokset koko tilasta sisältävät keskimääräisesti pienempiä poikkeamia kuin hallin avoimemmassa osassa. Huomattava on myös, että joissain kohteissa eri menetelmillä on saatettu havaita tilan yksityiskohdasta pintatietoja kohteen eri pinnoilta joiden välinen matka aiheuttaa virheen. Tällaisen tilanteen syntyminen on mahdollista esimerkiksi tilan tuulikaapin katon kohdalla (Kuva 4.28 yläreuna), kun ei ole varmuutta onko Matterport-mallin muodostamiseen käytetty tuulikaapin katon ylä- vai alapinnalta saatuja etäisyystietoja.



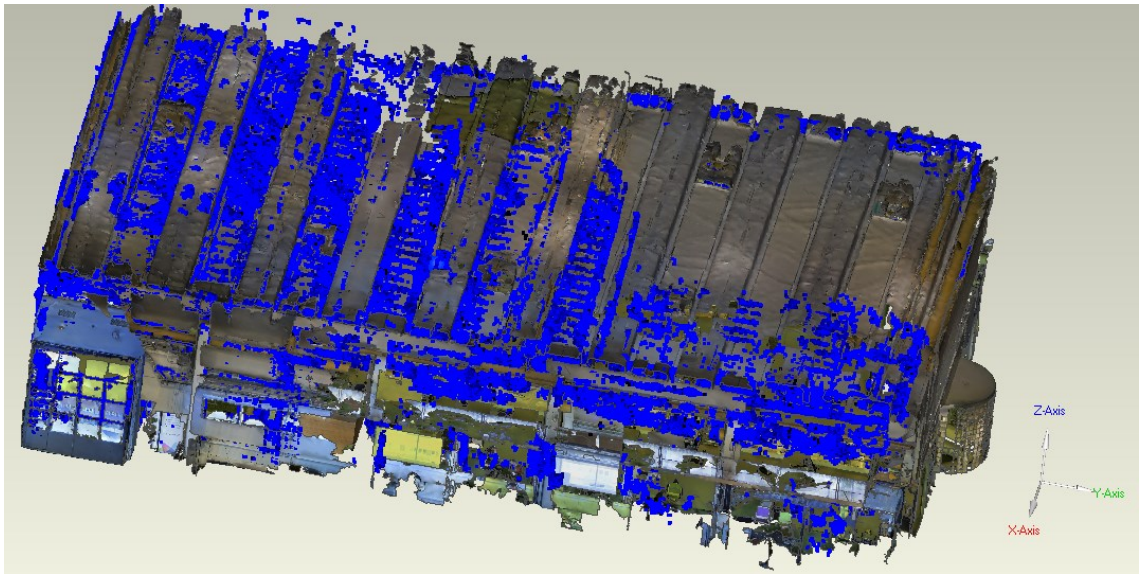
Kuva 4.28 Sisääntulotilan ja keittiön alueiden menetelmätulosten välisiä sijaintipoikkeamia.

Eroavaisuuksia tutkiessa täytyy muistaa, että laserkeilaus ja Matterport-kuvaukset suoritettiin eri päivinä. Tästä johtuen kokonaiseroavaisuuksien määrään on voinut vaikuttaa kohteen ei-kiinteät elementit. Tästä hyvänä esimerkkinä toimivat hallin perän avoimessa sijaitsevan pöytäryhmän kalustuksen aiheuttamat suuret enimmäisetäisyserot tulosten välillä (Kuva 4.26).

Koska valokuvien mallinnusmenetelmällä ei saada tuotettua absoluuttisessa mittakaavassa olevaa mallia, täytyi valokuvamallin ja Matterport-mallin vertailua varten valokuvista tuotetun mallin kokoa skaalata. Valokuvista tuotetun mallin kokoa skaalattiin siten, että mallin tilaleveys saatiin vastaamaan Matterport-mallin tilaleveyttä. Tämän jälkeen tarkastettiin myös valokuvamallin korkeus ja pituus ja havaittiin, että nämä dimensiot ovat myös muutoksen jälkeen metrin eromarginaalin sisällä Matterport-malliin verrattuna. Kuvassa (Kuva 4.29) Matterport-malli ja valokuvien pistepilvi on asetettu linjaan keskinäistä vertailua varten. Valokuvien pistepilvi on kuvassa väritetty sinisellä.

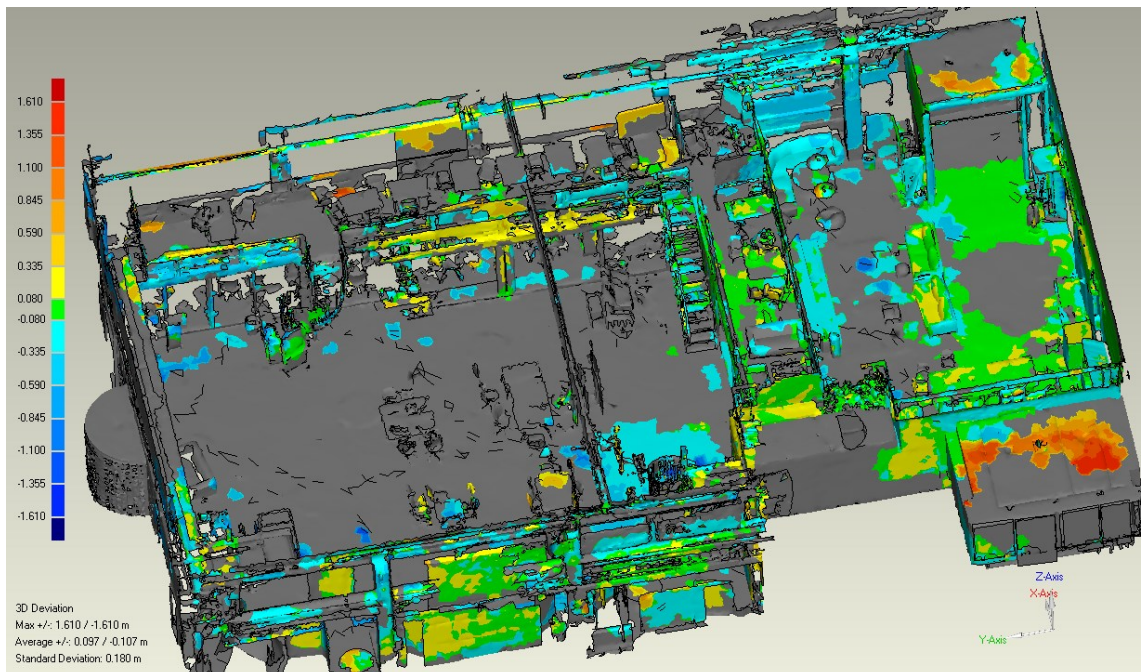


Ennen varsinaista vertailua pistepilvestä poistettiin joitain selkeästi virheellisiä hajanaisesti tilan ulkopuolelle sijoittuvia pisteitä.



Kuva 4.29 Matterport-malli ja valokuvista tuotettu pistepilvi linjaan asetettuina.

Vertailusta otetusta kuvasta (Kuva 4.29) on nähtävissä, että valokuvista tuotettu pistepilvi kattoi kuvatun kohteen Matterport-malliin verrattuna heikosti. Tilan (Kuva 4.30) avoimemmasta päädyistä pisteistöä on saatavilla lähinnä tilan seinistä sekä parven ja alkovioiden rakenteista.



Kuva 4.30 Matterport-mallin ja valokuvista tuotetun mallin etäisyyseroja.

Kuten kuvasta (Kuva 4.30) voi nähdä, on Matterport-mallin kattavuus valokuvista tehdyn pistepilven kattavuutta parempi. Erityisesti tilan aukeissa osissa, sekä parvella, missä sijaitisi paljon irtaimistoa, valokuvien pistepilven kattavuus on heikko. Kooltaan

rajatumman sisääntulotilan ja kattorakenteiden pistekattavuus on parempi, kuten aikaisemmista valokuvien pistepilveä esittävistä kuvista saattoi havaita (Kuva 4.23 ja Kuva 4.29).

Matterport-mallin ja valokuvapistepilven poikkeavuuksia tarkastellessa havaittiin, että keittiön katon suuret virheet (Kuva 4.30 oikea alakulma) johtuvat siitä, että valokuvista saadussa pistepilvessä on tilatietoa myös keittiön yläpuoliselta parvelta, jota taas Matterport-mallissa ei ole. Valokuvien pistepilvessä taas puolestaan ei ole mainittavaa määrää pisteitä, jotka kuvaisivat keittiön kattoa. Näin ollen virhe syntyy sellaisten tilatietojen vertailusta, jotka eivät esitä samaa kohdetta.

Tarkastellessa eri pistepilvien vertailua Matterport-malliin voidaan havaita, että valokuvamallin ja Matterport-mallin keskihajonnat ovat koko tilan ja osatilojen kohdalla suurempia. Keskihajontojen ja etäisyyserojen keskiarvojen erot eri vertailuissa kertovat, että valokuvapohjaisessa mallissa poikkeamat Matterport-malliin verrattuna ovat suurempia. Hallin avoimemmasta päästä laskettu mallien eroavaisuus on Matterport-mallin ja valokuvista lasketun pistepilven välillä huomattavan suuri.

Alla olevaan taulukkoon (Taulukko 4) on koottu valokuvien pistepilven ja Matterport-mallin ja näiden osien eroja.

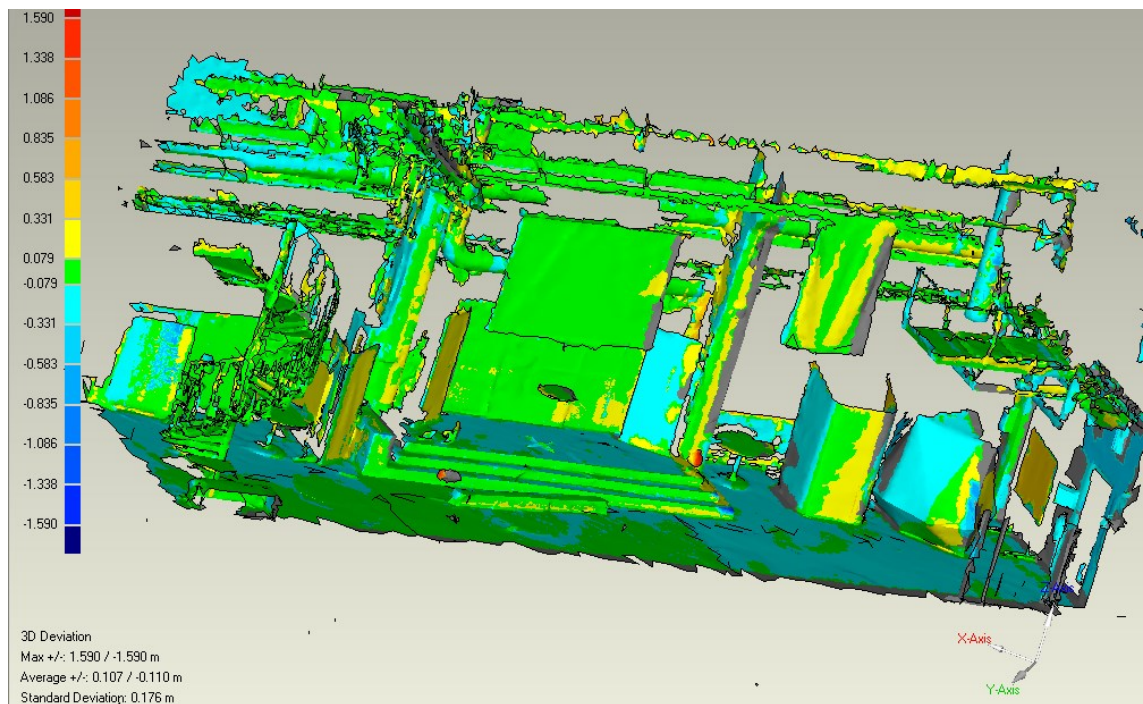
**Taulukko 4 Eri menetelmien tulosten välisiä eroja, Matterport ja valokuvaus.**

	Etäisyyserojen keskiarvo	Keskihajonta
Koko tila (katto sisältyy verrattaviin tietoihin)	+ 0,104 m - 0,112 m	0,179 m
Sisääntulotila ja keittiö	+ 0,055 m - 0,083 m	0,126 m
Parvi ja kontti	+ 0,233 m - 0,182 m	0,290 m
Hallin pinta-alaltaan suurimman osan lattia-alue ilman parvea ja konttia	+ 0,284 m - 0,270 m	0,406 m
Kattorakenteet	+ 0,165 m - 0,166 m	0,207 m

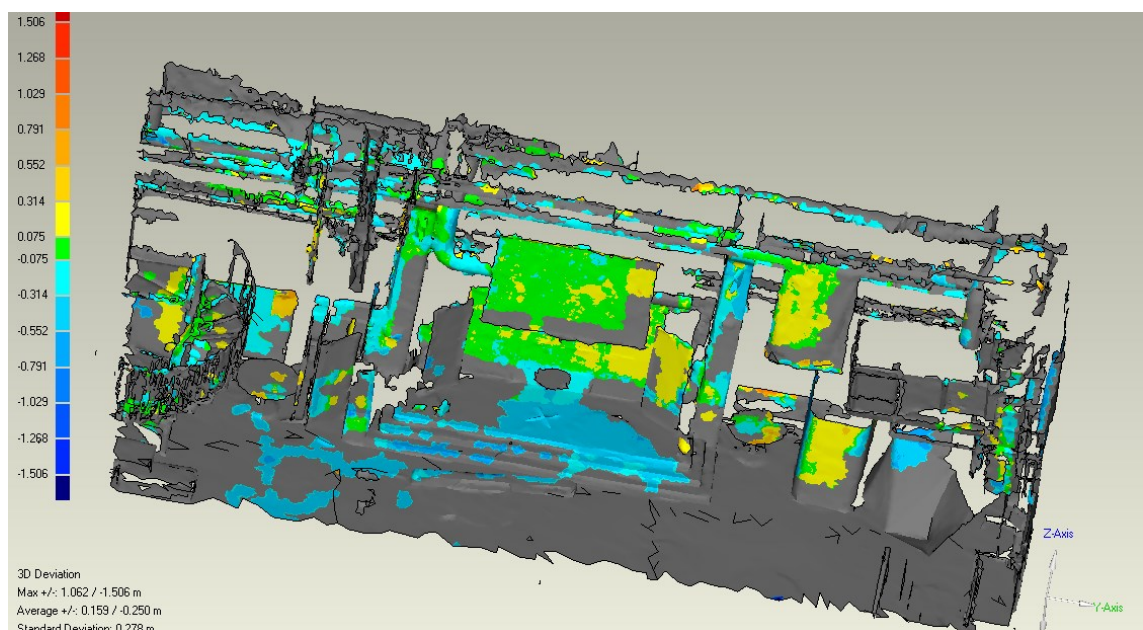
Yleisessä tulosten laadun vertailussa täytyy huomioida, että valokuvista tuotetussa mallissa on huomattavan suuria alueita, joilta piste-edustusta ei pilvessä ole lainkaan. Tämän vuoksi eri mallien välisistä vertailuista saatavien lukuarvoerojen lisäksi kannattaa tarkastella myös Geomagic Qualifyllä tuotettuja eroavaisuuskuvia.



Koska hallin avoimemmasta osasta valokuvista tuotettu pistepilvi ei kattanut tilaa kovin laajasti, suoritettiin eri mallien vertailua sellaisesta hallin seinäalueesta, josta kaikilla menetelmillä saatiin tuloksia. Eri vertailujen tuloksien otetuista kuvista (Kuva 4.31 ja Kuva 4.32) voi nähdä, että tilassa on yksityiskohtia, joiden kohdalla valokuvien ja laserkeilauksen pistepilvien erot Matterport-mallista ovat suuruudeltaan lähekkäisiä, mutta valokuvapistepilven tapauksessa erot Matterport-malliin vaihtelevat huomattavasti enemmän.



Kuva 4.31 Laserkeilauspistepilven ja Matterport-mallin välisiä etäisyyseroja hallin seinän sijaintitiedoissa.



Kuva 4.32 Valokuvien pistepilven ja Matterport-mallin välisiä etäisyyseroja seinän sijaintitiedoissa.

Yksittäisen seinän sijaintitiedot eivät eri mallien välillä poikenneet yhtä suuresti kuin koko avoimen osan sijaintitiedot, mutta valokuvista saadun pistepilven ja Matterport-mallin etäisyyksien keskihajonta ja etäisyyksien keskiarvot olivat suuremmat kuin vastaavat erot Matterport-mallin ja laserkeilauksen pistepilven välillä.

## 5 Yhteenveto

Työssä perehdyttiin kolmeen erilaiseen sisätilojen tilatiedon keräysmenetelmään. Tarkoituksena oli tarkastella menetelmien työnkulkua, tarvittavaa välineistöä ja käytettävyyttä. Työprosessin arvioimisen lisäksi paneuduttiin eri menetelmin tuotetun tilatiedon keskinäisiin eroihin. Mallinnuskohteeksi valittiin Espoossa sijaitseva Startup Sauna. Tilan mallinnusmahdollisuuksia haluttiin tutkia, koska kolmiulotteisilla malleilla olisi potentiaalia tilan mainonta- ja tulevan käytön suunnitteluvälineinä. Kolmiulotteisen mallin avulla olisi myös mahdollista visualisoida monikäyttöisen tilan mahdollisia kehityssuunnitelmia.

Käyttöön valitut menetelmät olivat laserkeilaus, Matterport-syvyyskamerakuvaus ja perinteisten valokuvaus. Laserkeilauksessa käytössä oli Faro Focus<sup>3D</sup>, joka kuuluu laserkeilainten uusimpaan sukupolveen. Syvyyskamerana käytettiin Matterportin kameraa, ja menetelmän kiinnostavuus perustui Matterportin tarjoamaan kokonaispalvelukonseptiin. Matterport tarjoaa kuluttajan käyttöön palvelukokonaisuutta, jossa kuluttaja kuvaa haluamansa kohteen ja Matterport pilvipalvelussaan rakentaa kohteesta valmiin 3D-mallin. Matterport-palvelun tarjoajan mukaan käyttöön tarjottu menetelmä on suunniteltu erityisesti rakennetun ympäristön sisätilojen kuvaamista ja mallinnusta varten. Valokuvat edustavat menetelmänä perinteisempiä tekniikoita, mutta kuvilta tehtävään mallinnukseen valittiin ohjelmistot, joiden toiminta perustuu kuvapohjaisen mallinnuksen viimeisimpään tutkimustietoon.

Jo työn suunnitteluvaiheessa ilmeni eri menetelmien käytön vaatimusten eroja. Lähtökohtana oli oletus, että laserkeilaus ja syvyyskamerakuvaus muistuttavat menetelminä toisiaan. Suunnittelun yhteydessä kuitenkin havaittiin, että Matterport-kuvauksen toteutuksen vaatimuksista johtuen syvyyskamerakuvaukset jouduttiin suunnittelemaan huomattavasti yksityiskohtaisemmin kuin laserkeilaus. Valokuvauksen kohdalla huomioitavaksi seikaksi nousi tilan irtaimistosta johtuvien katvepaikkojen karsiminen.

Laserkeilauksessa datan kerääminen ja käsittely vaativat työn tekijältä ennakko-osaamista tai ulkopuolelta saatavaa opastusta. Tilatiedon keräys olisi ollut mahdollista myös laserkeilaimen mukana saatua käyttöohjetta noudattaen, mutta tämä olisi lisännyt käytettyä työaikaa huomattavasti. Laserkeilausaineiston käsittelyyn käytetty ohjelma oli



niin ikään laitevalmistajan tuote ja laitevalmistajalla oli kattava ohje kyseisen ohjelman käyttöä opastamaan. Tästä ohjelmasta ei ollut aikaisempaa käyttökokemusta, mutta laitevalmistajan ohjeen avulla myös kokemattoman käyttäjän oli mahdollista suorittaa perustoimia laserkeilausaineiston käsittelystä. Kuluttajatason käytölle suurimpana esteenä on laserkeilauksen vaatimien välineiden korkea hinta.

Laserkeilaamalla tuotettu pistepilvi kuvasi hyvin kohteena ollutta tilaa. Tulospilveä tarkastellessa voitiin kuitenkin havaita menetelmälle haasteellisia elementtejä kohteessa ja tilan pistepilvestä jäi puuttumaan joidenkin tilan alueiden tilatiedot. Tämä johtui tilan tiheästä ja vaihtelevan muotoisesta irtaimistosta. Yksi selkeä virhelähde olivat tilassa sijaitsevat läpinäkyvät tai läpikuultavat elementit. Suuresta osasta läpikuultavia pintoja saatiin taltioitua pisteitä vain osasta pintatasoa. Myös tilassa liikkuvien ihmisten huomattiin tuottavan vääristymiä lopulliseen pisteaineistoon. Keilausaineistojen prosessoinnin seurauksena todettiin, että laserkeilauksella tuotettu pistepilvi on hyvin tiheä ja sisältää tarkkaa geometristä tietoa kohteesta. Tilatiedon jatkokäytön kannalta tämä osoittautui ongelmalliseksi, sillä tiheä pistepilvi oli raskas käsitellä ja vaati suuren datantallennuskapasiteetin.

Matterport osoittautui työvälineenä aloittelijaystävälliseksi. Kuvausten suorittaminen oli yksinkertaista ja palveluntarjoajalla on tuottanut verkkosivuillaan helposti ymmärrettävä käyttäjäopas. Koska kuvauksen onnistumista voitiin seurata aktiivisesti koko suorituksen ajan, voitiin kuvamateriaalin kohteen kattavuutta ja virheettömyyttä valvoa. Datan käsittely ja kolmiulotteisen mallin muodostus kuuluvat Matterportin palveluun, joten käyttäjän itse ei tarvitse hallita datan käsittelyä. Kustannuksiltaan Matterport-kamera on huomattavasti edullisempi kuin laserkeilaukseen käytetty välineistö. Kameran hankinnan aiheuttamien kustannusten lisäksi Matterportin pilvipalvelun ja portaalin käytöstä veloitetaan kuukausittainen korvaus. Matterport kaikkine osakustannuksineen on edullisempi kuin laserkeilauksen vaatimat välineet.

Matterport-syvyyskameralla tuotetussa mallissa oli nähtävillä selkeää yksityiskohtien vääristymistä. Lisäksi mallista nähtiin kuinka lyhyt kyseisen kameran näköetäisyys on, koska tilan äärilaidoille muodostui alueita, joilta ei ollut saatavilla tilatietoa. Tilan elementit, joiden muoto oli selkeästi havaittavissa ja jotka sijaitsivat tilassa siten, että niiden ympäriltä oli mahdollista kuvata, taltioituivat malliin visuaalisesti kauniisti.

Matterport-tekniikka soveltuu tämän työn havaintojen perusteella tilaltaan rajoittuneempien kohteiden kuvaamiseen. Kuvattavalle kohteelle ja kuvaustilanteelle asetettavat ehdot, joilla lopputuloksen onnistumista voidaan varmistaa, ovat käyttäjäohjeen mukaan tarkasti määrättyjä. Matterportilla kuvattu aineisto vaatii tallennuskapasiteettia taulutietokoneelta kuvausten suorittamisen aikana. Tallennustilan vaatimus ei aiheuttanut ongelmia työn kohteessa, vaikka kyseessä oli hyvin suuri tila ja yksittäisiä Matterport-kuvaustapahtumia oli lähes sata.

Valokuvauksessa käyttökelpoisen kuvamateriaalin saanti osoittautui haastavaksi. Tilan suuren koon, vaihtelevuuden ja suuren irtaimistomäärän vuoksi hyvän kuvausgeometrian luonti ja hyvän näkyvyyden saavuttaminen olivat vaikeita. Käyttökelpoinen kuvasarja saatiin tuotettua vasta toisella kuvauskerralla. Kuvien käsittelyyn käytetyt ohjelmat eivät vaatineet pistepilven muodostusoperaatiossa käyttäjältä muuta interaktiota kuin kuvien lataamisen käytettäviin ohjelmiin. Kaikkiin kuvankäsittelyn yhteydessä käytettyihin ohjelmiin löytyi internetin kautta ohjeita ja neuvoja. Myös kuvamateriaalin hankintaan liittyviä neuvoja löytyi runsaasti. Tämän ansiosta työn yhteydessä suoritettua pistepilven hankkimisprosessin voi suorittaa hyvin vähäisillä ennakkotiedoilla varustautunut henkilö. Tuotettu pistepilvi oli selkeästi harvempi kuin laserkeilauksella tuotettu pilvi ja se kattoi kohteen vain osittain. Valokuvat ja niiltä tuotettu pistetieto vaati muihin menetelmiin verrattaessa melko vähäisen tilakapasiteetin.

Tarkemmin eri menetelmien tulosten geometrisiä eroja tarkasteltiin verraten Matterport-mallia kahdella muulla menetelmällä tuotettuihin pistepilviin. Vertailuja tehtiin koko tilaa käsittävistä tilatiedoista, sekä tilan erillisistä osista siten, että toisistaan ominaisuuksiltaan poikkeavilta alueilta tehtiin omat eroavaisuustarkastelut.

Laserkeilaamalla ja Matterport-kameralla tuotetut tulokset olivat laajoilta osin geometrisesti lähellä toisiaan, mutta mallit sisälsivät myös selkeästi toisistaan eroavia tilatietoja. Syvyyskameralla tuotetusta aineistosta kävi ilmi, että osa kuvattun tilan elementeistä oli liian haastavia käytetylle menetelmälle ja näin aikaansaatu malli sisälsi selkeitä ja suuria geometrisiä poikkeamia laserkeilauspistepilveen verrattaessa. Laserkeilauksen ja syvyyskameroiden tulosten erot korostuivat, kun kohteena olevan tilan avoimuus ja koko kasvoivat.

Mallien vertailuissa pistepilvien etäisyyksiä laskettiin referenssiaineistona toimineesta Matterport-mallista sekä negatiivisina että positiivisina arvoina ja arvon etumerkki riippui siitä, sijoittuiko eroava vertailupiste Matterport-mallin sisä- vai ulkopuolelle. Laserkeilauksen pistepilven poikkeamien keskiarvot (sekä negatiivisten että positiivisten poikkeamien) olivat valtaosassa tilaa alle 10 senttimetriä. Ainoana poikkeuksena olivat hallin pinta-alaltaan suuremman ja avoimemman osan etäisyyspoikkeamien keskiarvot jotka olivat suuruudeltaan noin  $\pm 11$  cm. Valokuvien pistepilven ja Matterport-mallin etäisyyksien keskiarvot puolestaan olivat koko tilassa noin  $\pm 11$  cm ja muualla tilassa yli 15 senttimetriä. Poikkeuksena tähän olivat sisääntulotilan ja keittiön poikkeamakeskiarvot, jotka olivat alle 10 senttimetriä.

Etäisyyserojen keskihajonta Matterport-mallin ja valokuvapistepilven välillä oli 0,179 metriä ja vastaavasti Matterport-mallin ja laserkeilauksen pistepilven välillä 0,124 metriä. Molemmissa vertailuissa tilan osia vertaillessa sisääntulotilan ja keittiön alueen etäisyyserojen keskihajonnat olivat pienempiä ja muiden osittaisten alueiden keskihajonnat taas suurempia kuin koko tilan keskihajonnat. Suurimmat keskihajonnat tulosten etäisyyseroille (Matterport-malliin verrattaessa) saatiin hallin aukeimmasta osasta, jossa valokuvapistepilven vertailussa keskihajonta oli 0,406 metriä ja laserkeilapistepilven kohdalla vastaavasti 0,166 metriä.

Kaikkien menetelmien yhteydessä ongelmalliseksi osoittautui tilan aktiivinen käyttö ja siitä aiheutuvat ympäristön muutokset. Myös irto-objektien runsaus ja tilan elementit, kuten läpinäkyvät seinät ja avoin parvi loivat haastetta kuvausten suunnitteluun ja toteuttamiseen. Kaikilla menetelmillä kerätyissä materiaaleissa näkyivät tilan valaisuolosuhteiden muutokset. Suurin osa valon vaihtelun vaikutuksista oli kosmeettisia väriväärityksiä pistepilvessä tai tilan mallissa.

Kaikilla käytetyillä menetelmillä saatiin tuotettua kolmiulotteinen pistepilvi tai visualisointi kuvauskohteesta. Menetelmien tulokset poikkesivat toisistaan, mutta kaikki kerätty aineisto oli kelvollista mahdollista jatkokäsittelyä ajatellen. Menetelmätarkastelu osoitti, että myös mallinnukseen ja fotogrammetriaan perehtymätön henkilö voi kohtuullisella vaivannäöllä kyetä todellisen sisätilakohteen kolmiulotteiseen visualisointiin.

## Lähdeluettelo

Faro Focus<sup>3D</sup> Features, Benefits & Technical Specifications. Saatavilla: <http://www.faro.com/site/resources/share/944> [15.4.2015].

Matterport 3D capture app 2.0 - User guide. Saatavilla: <http://matterport.com/wp-content/uploads/2014/10/Matterport-3D-Capture-App-2.0-User-Guide.pdf> [21.3.2015].

Nikon D200. Saatavilla: [http://www.dpreview.com/products/nikon/slrs/nikon\\_d200](http://www.dpreview.com/products/nikon/slrs/nikon_d200) [28.4.2015].

Set up your Kinect play space for Xbox One. Saatavilla: <http://support.xbox.com/en-US/xbox-one/kinect/setup-play-space> [29.4.2015].

Startup Sauna. Saatavilla: <http://startupsauna.com/> [8.4.2015].

ALOIMONOS, J., 1988. Shape from texture. *Biological cybernetics*, **Vol 58**(No. 5), s. 345-360.

ARAYICI, Y., 2007. An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment. *Automation in Construction*, **Vol 16**(No. 6), s. 816-829.

ASKEY, P., Nikon D1 Review. Saatavilla: <http://www.dpreview.com/reviews/nikond1> [28.4. 2015].

AZHAR, S., KHALFAN, M. & MAQSOOD, T., 2012. Building information modelling (BIM): now and beyond. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, **Vol 12**(No. 4), s. 15-28.

BOEHLER, W., VICENT, M.B. & MARBS, A., 2003. Investigating laser scanner accuracy. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **Vol 34**(Part 5), s. 696-701.

BORNAZ, L., LINGUA, A. & RINAUDO, F., 2003, March. Terrestrial Laser Scanning. *GIM International*, 12.

BOSSE, M., ZLOT, R. & FLICK, P., 2012. Zebedee: Design of a spring-mounted 3-d range sensor with application to mobile mapping. *Robotics, IEEE Transactions on*, **Vol 28**(No. 5), s. 1104-1119.

DIALLO, A., BRITTON, B. & BUTLER, R., Nikon D800/D800E - Review. Saatavilla: <http://www.dpreview.com/reviews/nikon-d800-d800e> [28.4.2015].

DICK, A.R., TORR, P.H., RUFFLE, S.J. & CIPOLLA, R., 2001. Combining single view recognition and multiple view stereo for architectural scenes, *Computer Vision, 2001. ICCV 2001. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on 2001*, IEEE, s. 268-274.

DU, H., HENRY, P., REN, X., CHENG, M., GOLDMAN, D.B., SEITZ, S.M. & FOX, D., 2011. Interactive 3D modeling of indoor environments with a consumer depth camera, *Proceedings of the 13th international conference on Ubiquitous computing. ACM*, 2011, s. 75-84.

GIBSON, S., HUBBOLD, R.J., COOK, J. & HOWARD, T.L., 2003. Interactive reconstruction of virtual environments from video sequences. *Computers & Graphics*, **Vol 27**(No. 2), s. 293-301.

GOLPARVAR-FARD, M., BOHN, J., TEIZER, J., SAVARESE, S. & PEÑA-MORA, F., 2011. Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. *Automation in Construction*, **Vol 20**(No. 8), s. 1143-1155.

HÄHNEL, D., BURGARD, W. & THRUN, S., 2003. Learning compact 3D models of indoor and outdoor environments with a mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems*, **Vol 44**(No. 1), s. 15-27.

HENRY, P., KRAININ, M., HERBST, E., REN, X. & FOX, D., 2012. RGB-D mapping: Using Kinect-style depth cameras for dense 3D modeling of indoor environments. *The International Journal of Robotics Research*, **Vol 30**(No. 5), s. 647-663.

KONOLIGE, K., 2010. Projected texture stereo, *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on 2010*, IEEE, s. 148-155.

LANGMANN, B., HARTMANN, K. & LOFFELD, O., 2012. Depth camera technology comparison and performance evaluation, 2012, s. 438-444.

LEHTOLA, V.V., KURKELA, M. & HYYPPÄ, H., 2014. Automated image-based reconstruction of building interiors - a case study. *The Photogrammetric Journal of Finland*, **Vol 24**(No. 1).

LEHTOLA, V.V. & RONNHOLM, P., 2014. Image enhancement for point feature detection in built environment, *Systems and Informatics (ICSAI), 2014 2nd International Conference on 2014*, s. 774-779.

LEHTOLA, V.V., VIRTANEN, J., KUKKO, A., KAARTINEN, H. & HYYPPÄ, H., 2015. Localization of mobile laser scanner using classical mechanics. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **99**, s. 25-29.

LIEBOWITZ, D., CRIMINISI, A. & ZISSERMAN, A., 1999. Creating architectural models from images, *Computer Graphics Forum 1999*, Wiley Online Library, s. 39-50.

LIU, T., CARLBERG, M., CHEN, G., CHEN, J., KUA, J. & ZAKHOR, A., 2010. Indoor localization and visualization using a human-operated backpack system, *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2010 International Conference on 2010*, IEEE, s. 1-10.

MENDENHALL, S., 2011. Mobile Laser Scanning. *CE News*, **Vol 23**(No. 5), s. 42-43.

PRADOS, E. & FAUGERAS, O., 2006. Shape from shading. *Handbook of mathematical models in computer vision*. Springer, s. 375-388.

PU, S. & VOSSELMAN, G., 2009. Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **Vol 64**(No. 6), s. 575-584.

QINGXIONG YANG, KAR-HAN TAN, CULBERTSON, B. & APOSTOLOPOULOS, J., 2010. Fusion of active and passive sensors for fast 3D capture, *Multimedia Signal Processing (MMSP), 2010 IEEE International Workshop on* 2010, s. 69-74.

REMONDINO, F., 2011. Heritage recording and 3D modeling with photogrammetry and 3D scanning. *Remote Sensing*, **Vol 3**(No. 6), s. 1104-1138.

REMONDINO, F. & EL-HAKIM, S., 2006. Image-based 3D Modelling: A Review. *The Photogrammetric Record*, **Vol 21**(No. 115), s. 269-291.

ROTHERMEL, M. & WENZEL, K., SURE - Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery.

Saatavilla: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/sure/index.en.html> [8.3.2015].

WEHR, A. & LOHR, U., 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **Vol 54**(No. 2–3), s. 68-82.

WESTOBY, M.J., BRASINGTON, J., GLASSER, N.F., HAMBREY, M.J. & REYNOLDS, J.M., 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, **Vol 179**, s. 300-314.

WU, C., VisualSFM: A visual structure from motion system. Saatavilla: <http://ccwu.me/vsfm/> [5.4.2015].

## Liiteluettelo

Liite 1 Laserkeilauksen pistepilven 3D-näkymiä

Liite 2 Laserkeilauksen pistepilven harventamisen vaikutus kohteen yksityiskohtien esitystarkkuuteen

Liite 3 Matterport-mallin ja laserkeilauksen pistepilven etäisyyseroja

Liite 4 Matterport-mallin ja valokuvista tuotetun pistepilven etäisyyseroja



## Liite 1 Laserkeilauksen pistepilven 3D-näkymiä



Henkilökunnan lasiseinäinen työhuone

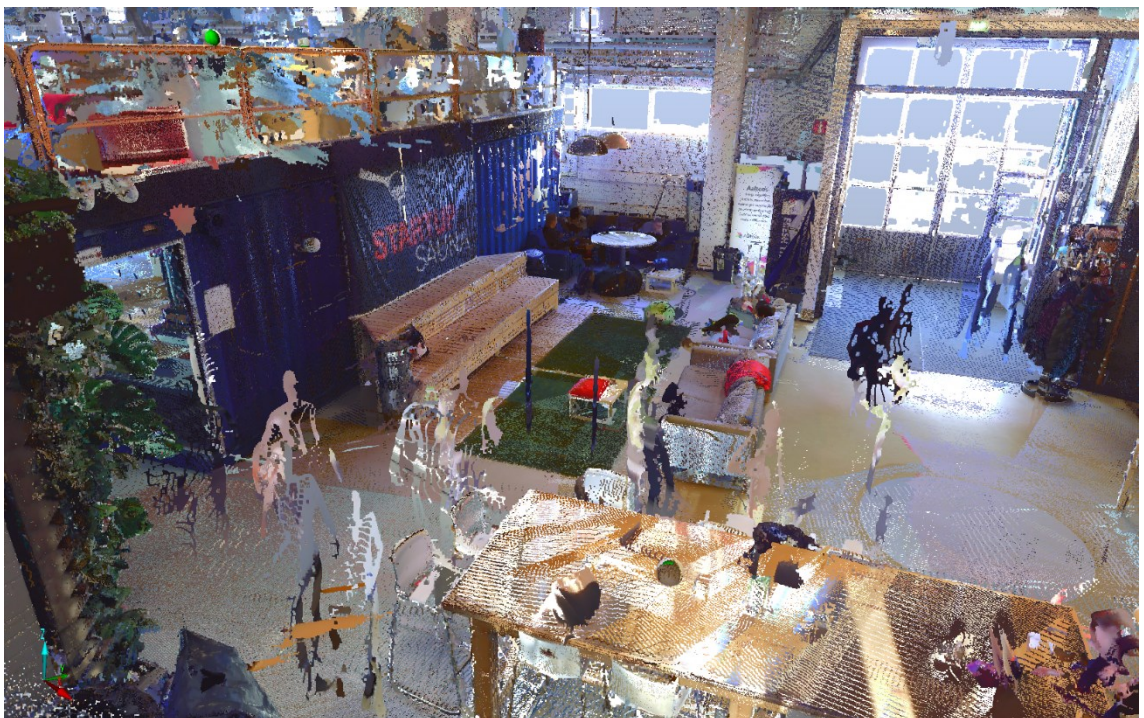


Näkymä hallin avoimesta tilasta parvelta katsottuna.





Hallin alkovit ja parvi.



Ihmisten keilausten välillä muuttuvan läsnäolon vaikutus pistepilveen.



## Liite 2 Laserkeilauksen pistepilven harventamisen vaikutus kohteen yksityiskohtien esitystarkkuuteen.



Laserkeilauspilvessä 800 miljoonaa pistettä (kuvan näkymä on vain osa pilvää).



Laserkeilauspilvessä 240 miljoonaa pistettä (kuvan näkymä on vain osa pilvää).





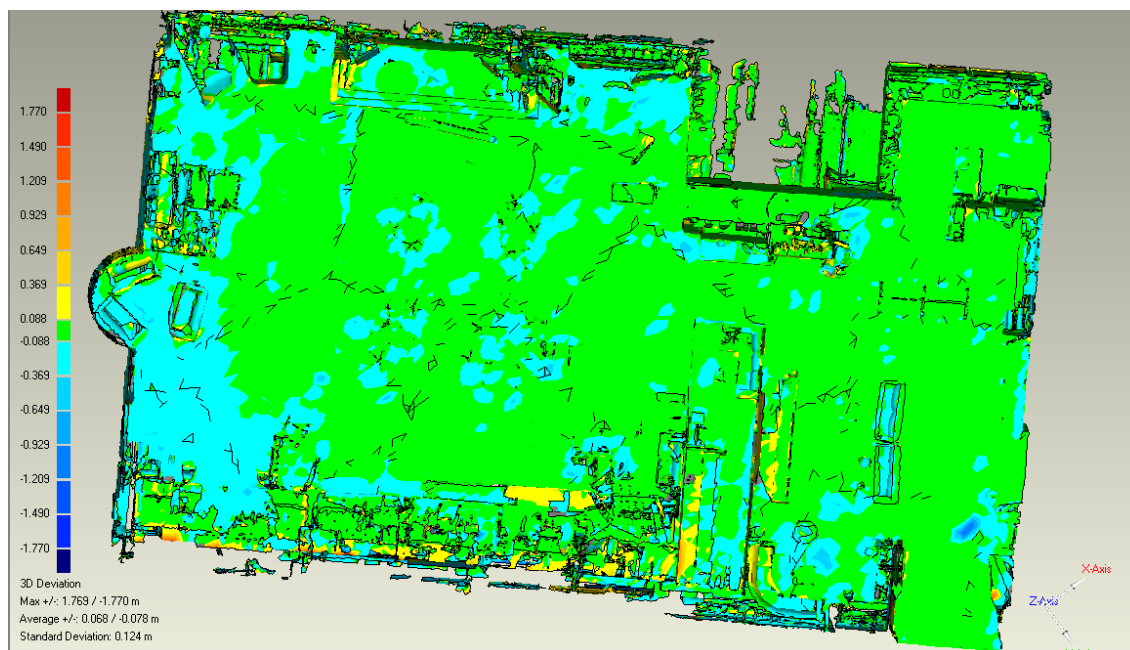
Laserkeilauspilvessä 136 miljoonaa pistettä (kuvan näkymä on vain osa pilveä).



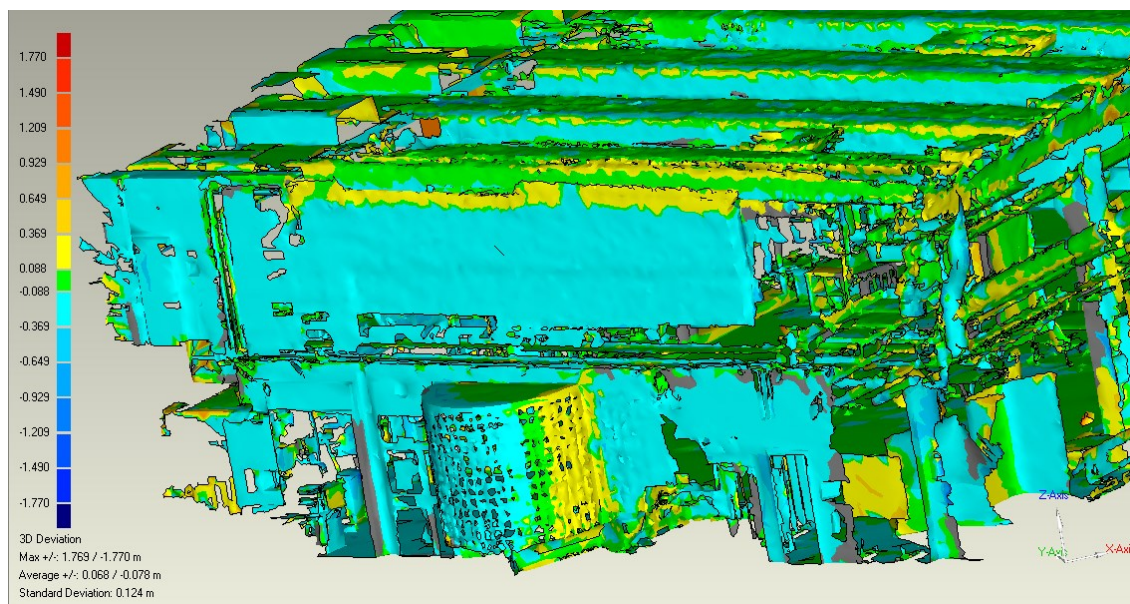
Laserkeilauspilvessä 84 miljoonaa pistettä (kuvan näkymä on vain osa pilveä).



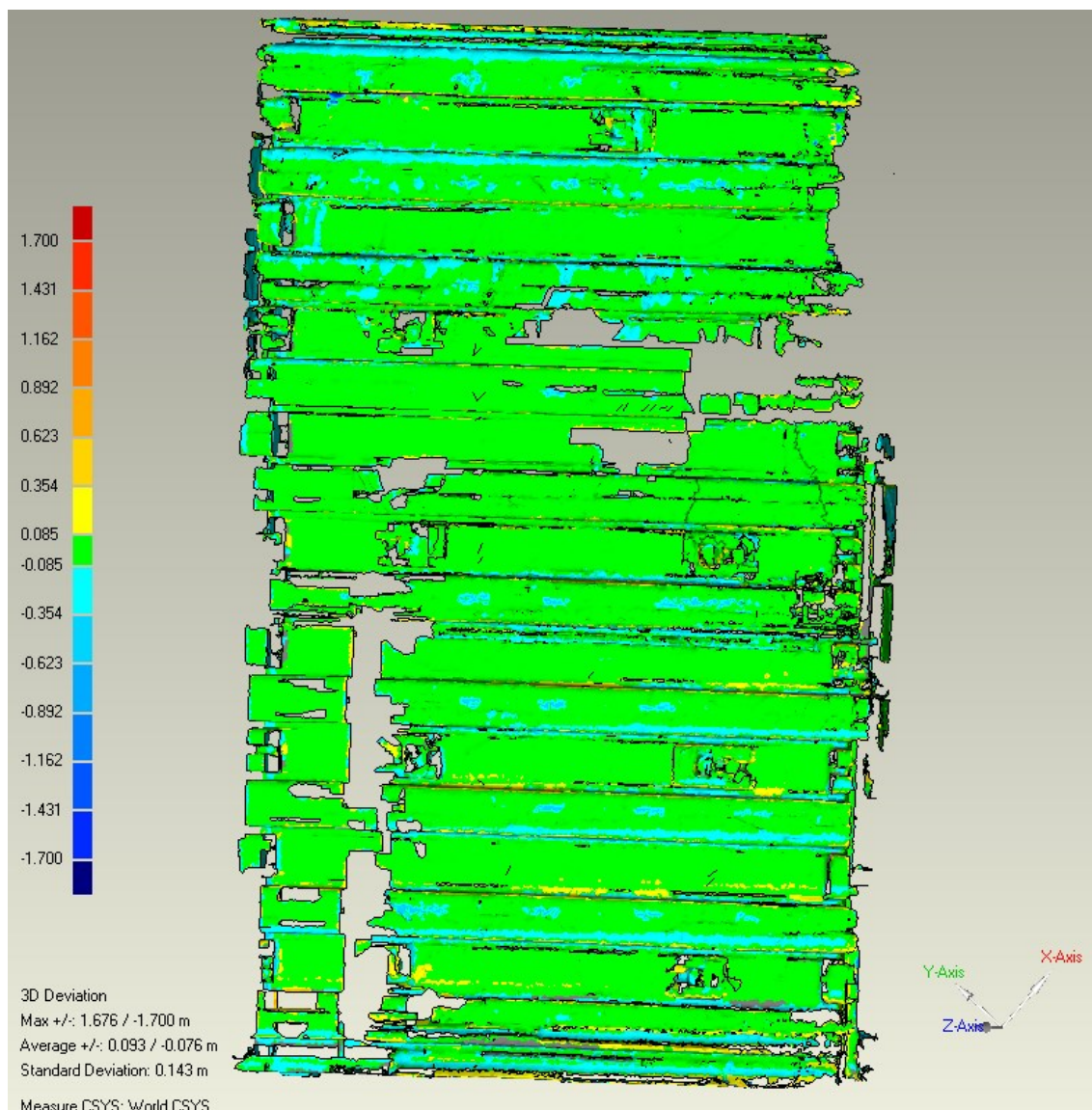
## Liite 3 Matterport-mallin ja laserkeilauksen pistepilven etäisyyseroja



Tulosten etäisyyksien eroja lattiassa.



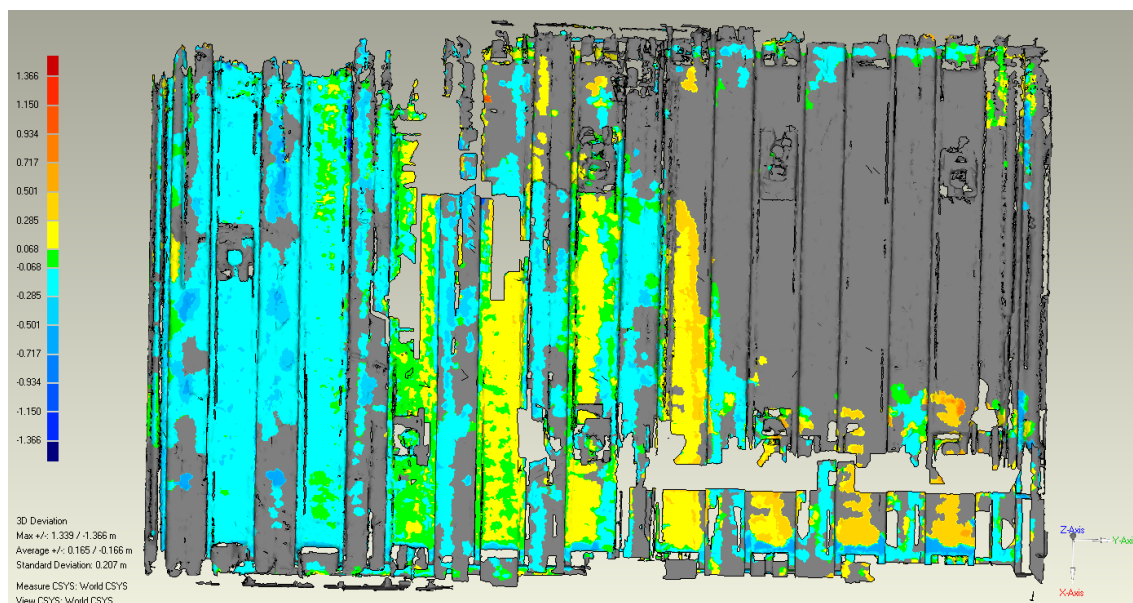
Tulosten etäisyyseroja tilan avoimen osan perä- ja lasitiiliseinällä.



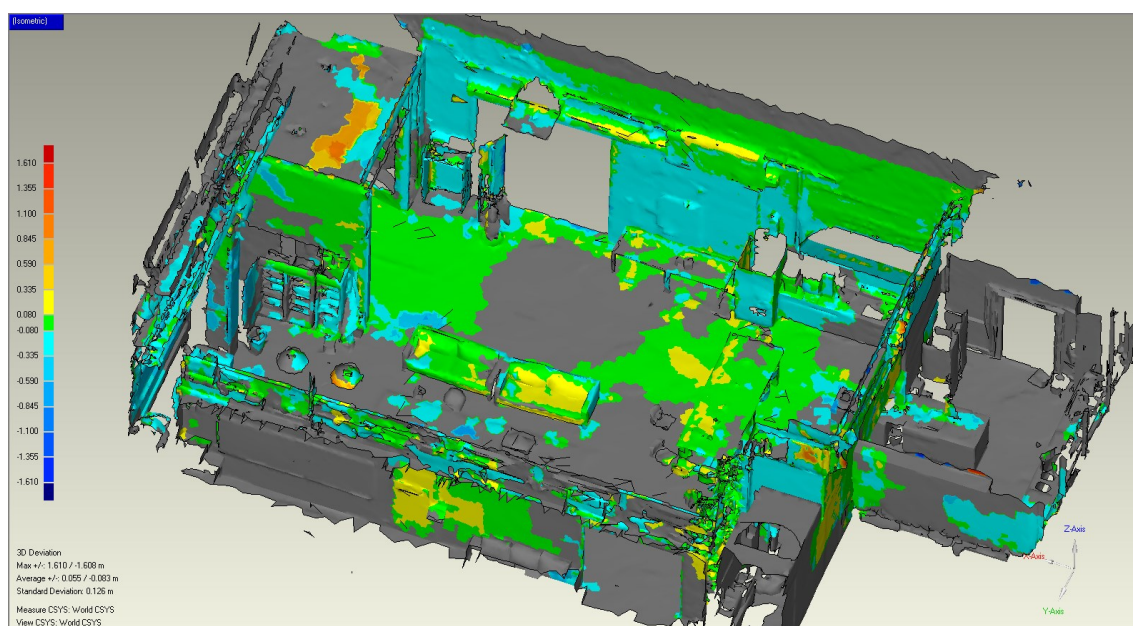
Mallien etäisyyseroja kattorakenteissa.



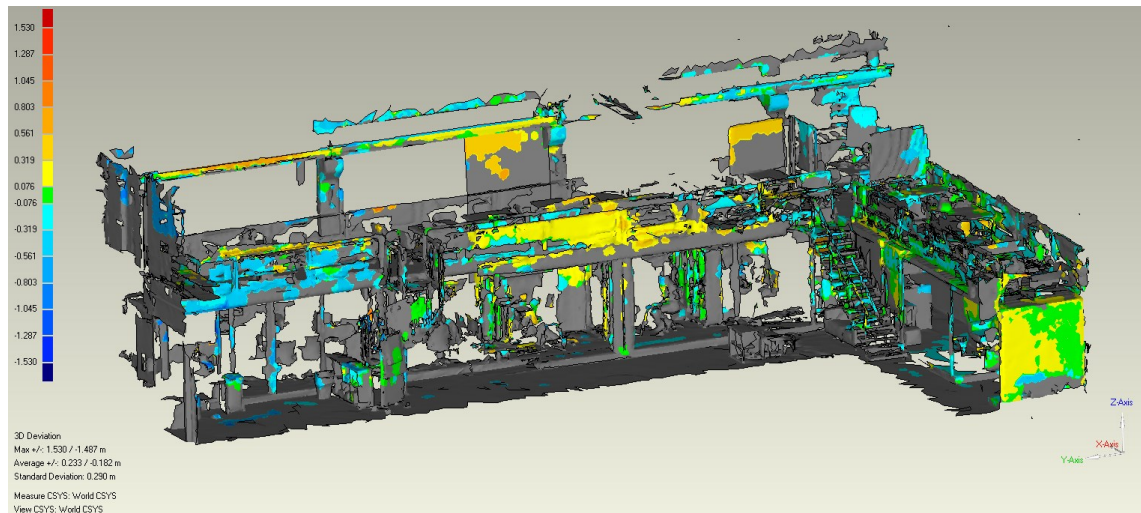
## Liite 4 Matterport-mallin ja valokuvista tuotetun pistepilven etäisyyseroja



Katon rakenteiden kuvaustulosten välisiä eroja.



Sisäantolutilan ja keittiön alueen kuvaustulosten välisiä eroja.



Parven, alkovi- ja kontin alueen kuvaustulosten välisiä etäisyyseroja.